

职业教育课程**改革创新**规划教材

● **精品课程系列** ●



电子测量仪器 及应用

◎ 杨亚平 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

职业教育课程改革创新规划教材
· 精品课程系列 ·

电子测量仪器及应用

杨亚平 主编
刘亚川 杨 展 参编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以常用电子测量仪器及其主要应用为主线,讲述电子测量仪器的基本工作原理、操作使用方法和测量应用实训。本书以项目和任务为章节,内容包括电子测量与仪器基础知识,电压测量仪器及应用,信号发生器及应用,电子示波器及应用,电子计数器及应用,频域测量仪器及应用,电子元器件测量仪器及应用,智能仪器与自动测量技术,虚拟仪器技术及应用共9个项目。每个项目中都有结合实际应用的多项实训,使读者在学完本书后,即可使用各种电子测量仪器进行相关测量与测试工作。

本书可作为各类职业院校电子技术应用及相关专业的教学用书,也可供从事电子测量与测试工作的工程技术人员和广大电子爱好者作为参考。

为方便教师教学,本书还配有电子教学参考资料包,详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量仪器及应用/杨亚平主编. —北京:电子工业出版社,2013.3

职业教育课程改革创新规划教材·精品课程系列

ISBN 978-7-121-19708-6

I. ①电… II. ①杨… III. ①电子测量设备-中等专业学校-教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第038327号

策划编辑:张帆

责任编辑:张帆

印刷:

装订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:15 字数:384千字

印次:2013年3月第1次印刷

定价:29.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前言



随着电子信息产业的发展,各种电子测量仪器的应用越来越广泛。在电子产品的研制、生产、调试和维修过程中,都离不开各种电子测量仪器。学习电子测量仪器的基本知识、掌握电子测量仪器的操作方法、熟练使用各种电子测量仪器来进行相关工程测量与测试,对于电子技术应用及相关专业的学生来说都是非常重要的。

本教材以培养应用型人才为目标,突出职业教育的特点,紧密结合电子测量工程实践进行教学。在选材上注重系统性、综合性、实用性和先进性;对专业基础知识以够用为止,加大技能实训比重,并从多方面反映电子测量仪器的新发展。在形式上采用项目教学和任务驱动法的编写模式,将电子测量仪器基础知识、常用仪器介绍和测量应用实训融为一体,紧紧围绕完成实训任务的需要选择教学内容,将全部教学活动分成若干个项目,以项目为单位组织教学,使学生在学电子测量仪器基础知识的同时,掌握电子测量仪器的实际应用,以提高学生的实践操作技能,培养学生的综合职业能力。

本教材以常用电子测量仪器及其主要应用为主线,讲述了电子测量仪器的工作原理、操作使用方法和测量应用实训。全书共分为9个项目,内容包括电子测量与仪器基础知识,电压测量仪器及应用,信号发生器及应用,电子示波器及应用,电子计数器及应用,频域测量仪器及应用,电子元器件测量仪器及应用,智能仪器与自动测量技术,虚拟仪器技术及应用等内容。每个项目中都有结合实际测量应用的多项实训,使读者在学完本书后,能熟练使用各种电子测量仪器进行相关测量与测试工作。

本教材由杨亚平老师担任主编,并编写项目1、3、4、6、7;项目8、9由刘亚川老师编写;项目2、5由杨展老师编写。在本教材的编写过程中,参阅了大量有关著作和文献资料,并得到了多位老师的帮助,在此向他们表示真诚的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误之处,敬请使用本书的师生及读者批评指正。

为了方便教师教学,本书还配有教学指南、电子教案和习题答案(电子版)。请有此需要的教师登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册后再进行下载,有问题请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系(E-mail:hxedu@phei.com.cn)。

编者

2013年2月



目 录



项目 1 电子测量仪器基础知识	1
任务 1 知识引领——电子测量的基本知识	1
知识 1.1 电子测量及内容	1
知识 1.2 电子测量的特点	2
知识 1.3 电子测量的基本方法	3
任务 2 知识引领——测量误差的基本知识	4
知识 2.1 测量误差的分类	4
知识 2.2 测量误差的来源	5
知识 2.3 测量误差的表示方法	6
任务 3 知识引领——测量结果的数据处理	8
知识 3.1 有效数字的正确表示	8
知识 3.2 有效数字的舍入规则	9
知识 3.3 测量数据的运算法则	9
任务 4 知识引领——测量仪器的基本知识	10
知识 4.1 电子测量仪器的分类	10
知识 4.2 电子测量仪器的误差	11
知识 4.3 电子测量仪器的性能指标	11
任务 5 应用实训——误差计算与数据处理实训	12
实训 5.1 测量误差计算实训	12
实训 5.2 测量数据处理实训	13
本项目小结	14
项目 1 思考题	15
项目 2 电压测量仪器及应用	16
任务 1 知识引领——电压测量的基本知识	16
知识 1.1 电压测量的特点及要求	16
知识 1.2 电压表的分类	17
知识 1.3 交流电压的幅值参数	18
知识 1.4 电平的概念及测量	20
任务 2 仪器介绍——模拟式电子电压表	22
知识 2.1 放大-检波式电子电压表	22
知识 2.2 检波-放大式电子电压表	23
知识 2.3 热电偶变换式电子电压表	25
知识 2.4 模拟电子电压表的选择和使用	26
任务 3 仪器介绍——数字式直流电压表	27

知识 3.1 数字式电压表的组成	27
知识 3.2 数字式电压表的工作原理	27
知识 3.3 数字式电压表的性能指标	31
任务 4 仪器介绍——数字式万用表	32
知识 4.1 数字式万用表的结构组成	32
知识 4.2 数字式万用表的性能指标	33
知识 4.3 数字式万用表的使用方法	34
任务 5 应用实训——电压测量实训	35
实训 5.1 稳压电源参数测试实训	35
实训 5.2 不同波形电压换算实训	36
实训 5.3 数字式万用表应用实训	38
本项目小结	39
项目 2 思考题	40
项目 3 信号发生器及应用	41
任务 1 知识引领——信号发生器基本知识	41
知识 1.1 信号发生器的分类	41
知识 1.2 信号发生器的基本组成	42
知识 1.3 信号发生器的技术指标	43
知识 1.4 信号发生器的选择	45
任务 2 仪器介绍——低频信号发生器	45
知识 2.1 低频信号发生器的组成	45
知识 2.2 主振荡器类型与工作原理	47
知识 2.3 低频信号发生器的使用	48
任务 3 仪器介绍——高频信号发生器	51
知识 3.1 高频信号发生器的组成	51
知识 3.2 主振级的类型和工作原理	52
知识 3.3 高频信号发生器的使用	55
任务 4 仪器介绍——函数信号发生器	57
知识 4.1 函数信号发生器的类型	57
知识 4.2 三角波产生与正弦波变换	59
知识 4.3 函数信号发生器的使用	60
任务 5 应用实训——信号发生器应用实训	63
实训 5.1 低频放大器的性能测试（低频信号发生器的应用）	63
实训 5.2 调谐放大器的性能测试（高频信号发生器的应用）	65
实训 5.3 不同波形信号的电压测量（函数信号发生器的应用）	66
本项目小结	67
项目 3 思考题	68
项目 4 电子示波器及应用	69
任务 1 知识引领——电子示波器基本知识	69
知识 1.1 电子示波器的性能特点	69

知识 1.2	电子示波器的分类	70
知识 1.3	电子示波器的性能指标	71
任务 2	知识引领——示波器波形显示原理	71
知识 2.1	阴极射线示波管的构造	71
知识 2.2	电子束聚焦与偏转原理	72
知识 2.3	示波器波形显示原理	74
任务 3	仪器介绍——通用电子示波器	77
知识 3.1	通用电子示波器的组成	77
知识 3.2	通用电子示波器的性能指标	81
知识 3.3	通用电子示波器的应用	84
任务 4	仪器介绍——数字存储示波器	87
知识 4.1	数字存储示波器的性能特点	87
知识 4.2	数字存储示波器的组成原理	88
知识 4.3	数字存储示波器的工作方式	89
任务 5	应用实训——通用电子示波器使用实训	92
实训 5.1	信号参数测量实训	92
实训 5.2	低频放大器性能测试实训	93
实训 5.3	调幅与检波电路性能测试实训	94
本项目小结		95
项目 4 思考题		96
项目 5	电子计数器及应用	97
任务 1	知识引领——电子计数器基本知识	97
知识 1.1	频率与时间的测量方法	97
知识 1.2	电子计数器的分类	98
知识 1.3	电子计数器的基本原理	98
知识 1.4	电子计数器的性能指标	99
任务 2	仪器介绍——通用电子计数器	100
知识 2.1	通用电子计数器的结构组成	100
知识 2.2	通用电子计数器的测量原理	101
知识 2.3	通用电子计数器的使用	104
任务 3	知识引领——电子计数器的测量误差	108
知识 3.1	测量误差的来源	108
知识 3.2	频率测量误差	109
知识 3.3	周期和时间测量误差	110
知识 3.4	中界频率的确定	111
任务 4	仪器介绍——等精度电子计数器	112
知识 4.1	等精度频率测量原理	112
知识 4.2	时间间隔平均测量原理	113
知识 4.3	等精度电子计数器的使用	114
任务 5	应用实训——电子计数器应用实训	115

实训 5.1 信号源信号参数测量实训	115
实训 5.2 电视机扫描电路测试实训	117
实训 5.3 电子计数器测量误差计算实训	118
本项目小结	119
项目 5 思考题	119
项目 6 频域测量仪器及应用	120
任务 1 知识引领——频域测量基本知识	120
知识 1.1 频域和时域的关系	120
知识 1.2 频域测量的主要内容	121
知识 1.3 频域测量仪器的类型	122
任务 2 仪器介绍——频率特性测试仪	122
知识 2.1 频率特性的测试方法	122
知识 2.2 频率特性测试仪的工作原理	123
知识 2.3 频率特性测试仪的使用	126
任务 3 仪器介绍——频谱分析仪	131
知识 3.1 频谱分析仪的分类及用途	131
知识 3.2 频谱分析仪的工作原理	132
知识 3.3 频谱分析仪的性能指标	133
知识 3.4 频谱分析仪的选择和使用	135
知识 3.5 频谱分析仪的使用	135
任务 4 仪器介绍——谐波失真度测试仪	137
知识 4.1 失真度的定义及测量方法	137
知识 4.2 失真度测量仪的组成原理	138
知识 4.3 失真度测量仪的使用	139
任务 5 应用实训——频域测量实训	142
实训 5.1 调谐放大器谐振曲线测试实训	142
实训 5.2 鉴频器鉴频曲线测试实训	143
实训 5.3 功率放大器失真度测试实训	144
本项目小结	144
项目 6 思考题	145
项目 7 元器件测量仪器及应用	146
任务 1 知识引领——元器件测量基本知识	146
知识 1.1 电子元器件的分类及参数	146
知识 1.2 无源电路元件的参数	147
知识 1.3 电子元器件测量仪器的分类	148
任务 2 仪器介绍——万用电桥	149
知识 2.1 电桥的分类及平衡条件	149
知识 2.2 万用电桥的工作原理	151
知识 2.3 万用电桥的使用	152
任务 3 仪器介绍——高频 Q 表	154

知识 3.1	高频 Q 表的组成	154
知识 3.2	高频 Q 表的工作原理	154
知识 3.3	高频 Q 表的使用	156
任务 4	仪器介绍——半导体管特性图示仪	159
知识 4.1	半导体管特性图示仪的组成	159
知识 4.2	半导体管特性图示仪的工作原理	160
知识 4.3	半导体管特性图示仪的使用方法	162
任务 5	应用实训——电子元器件测量实训	165
实训 5.1	低频电路元件的测量实训（万用电桥的应用）	165
实训 5.2	高频电路元件的测量实训（高频 Q 表的应用）	166
实训 5.3	半导体器件测量实训（半导体管图示仪的应用）	167
本项目小结		173
项目 7 思考题		174
项目 8	智能仪器和自动测量技术	175
任务 1	知识引领——智能仪器简介	175
知识 1.1	智能仪器的一般概念	175
知识 1.2	智能仪器的功能特点	176
知识 1.3	智能仪器的基本结构	177
任务 2	知识引领——自动测试系统简介	178
知识 2.1	自动测量技术的发展	179
知识 2.2	自动测试系统的组成	180
知识 2.3	自动测试系统的总线	181
任务 3	应用实训——智能仪器应用实训	186
实训 3.1	智能数字电压表使用实训	186
实训 3.2	数字存储示波器使用实训	188
实训 3.3	温度测控系统性能测试实训	196
本章小结		198
项目 8 思考题		198
项目 9	虚拟仪器技术及应用	200
任务 1	知识引领——虚拟仪器的基本知识	200
知识 1.1	虚拟仪器的一般概念	200
知识 1.2	虚拟仪器的结构组成	201
知识 1.3	虚拟仪器的性能特点	202
任务 2	知识引领——虚拟仪器的软件	203
知识 2.1	LabVIEW 软件简介	203
知识 2.2	基本 VI 的组成	205
知识 2.3	LabVIEW 的模板	207
知识 2.4	LabVIEW 的数据类型	211
任务 3	知识引领——虚拟仪器的基本程序结构	212
知识 3.1	For 循环	213

知识 3.2	While 循环	214
知识 3.3	选择结构	215
知识 3.4	图形显示控件	215
任务 4	知识引领——虚拟仪器的数据采集	219
知识 4.1	数据采集系统	219
知识 4.2	数据采集硬件	219
知识 4.3	数据采集 VI	220
任务 5	应用实训——虚拟仪器应用实训	222
实训 5.1	正弦信号发生器设计实训	222
实训 5.2	频谱分析仪设计实训	224
本章小结	226
项目 9 思考题	227

项目 1 电子测量仪器基础知识



本项目任务目标

1. 学习电子测量的基本知识：应了解电子测量的内容、特点和基本方法。
2. 学习测量误差的基本知识：应了解测量误差的分类、来源和表示方法。
3. 学习测量结果的数据处理：应了解有效数字的概念、舍入规则和运算规则。
4. 学习电子测量仪器的基本知识：应了解电子测量仪器的分类、误差和技术指标。
5. 进行误差计算和数据处理实训：通过训练掌握误差计算和数据处理的基本技能。

任务 1 知识引领——电子测量的基本知识

知识 1.1 电子测量及内容

测量是以确定被测量值为目的的工作过程。在这一过程中需要借助专门的设备，将被测量与选作单位的同类标准量进行比较，从而取得用数值和单位共同表示的测量结果。

电子测量是测量学的一个重要分支，在电子测量过程中，以电子技术理论为依据，以电子测量仪器为手段，对各种电量、电信号、电路特性和元器件参数进行测量，还可以通过传感器对各种非电量进行测量，电子测量主要包括以下内容。

1. 电能量测量

电能量测量包括各种电量的电压、电流、电功率、电场强度等的测量。

2. 电信号特性测量

电信号特性测量包括信号的频率、周期、相位、频谱、失真度、调制度、信噪比、逻辑状态等的测量。

3. 元器件参数测量

元器件参数测量包括电阻、电容、电感、二极管、三极管、场效应管、集成电路等元器件的参数测量。



4. 电路性能测量

电路性能测量包括增益、衰减、灵敏度、通频带、频率特性、噪声系数等性能的测量。

5. 特性曲线显示测量

特性曲线显示测量包括信号的波形、频谱、逻辑关系；电路或系统的幅频特性曲线；元器件参数的特性曲线等的显示测量。

知识 1.2 电子测量的特点

电子测量技术与电子测量仪器的应用非常广泛，与其他测量方法和测量仪器相比有着无法比拟的众多优点，其主要特点如下。

1. 频率范围宽

在电子测量中对电信号的测量，其频率覆盖范围极宽，除直流外，可从 $10^{-6} \sim 10^{12}$ Hz。但不是同一台仪器能在这样宽的频率范围内工作。在不同的频率范围内，电子测量所依据的原理、采用的测量方法和使用的测量仪器也各不相同。随着电子技术的发展，单台仪器所覆盖的频率范围在不断扩大。

2. 量程范围宽

量程是指测量范围的上、下限值之差。在电子测量中，被测量的量值大小相差很大，量程可达 $10^{12} \sim 10^{16}$ 量级，因而要求测量仪器具有足够宽的测量范围。

3. 测量准确度高

电子测量的准确度比其他测量都高，但对于不同参数的测量，测量结果的准确度是不一样的，有些参数的测量准确度可以很高，而有些参数的测量准确度较低。其中频率和时间测量准确度可达到 10^{-13} 量级，这是目前在测量准确度方面达到的最高指标。

4. 测量速度快

由于电子测量是利用电子测量仪器完成的，因此其工作速度很高，几乎等同于电子运动和电磁波的传播速度，使得电子测量无论在测量速度，还是在测量结果的处理速度上，是其他测量方法不可比拟的。

5. 便于实现遥测

电子测量可以把测量仪器或与它连接的传感器放到人类自身无法到达或不便长期停留的地方进行测量。通过传感器把现场所需测量的量转换成易于传输的电信号，用有线或无线的方式传送到测量控制中心，从而实现遥测和遥控。

6. 可实现测量自动化

随着电子技术的迅速发展，特别是计算机技术的广泛应用，使电子测量仪器和设备呈现



出崭新的局面。现在许多电子测量仪器都具备与外界交换信息的功能，从而可构成功能完善的自动测量系统，实现测量自动化。

知识 1.3 电子测量的基本方法

测量的过程实际上是一个比较的过程。测量的任务就是通过实验的方法，将被测量（未知量）与已知标准量进行比较，以获得被测量的值。一个电参数的测量，可通过不同的测量方法来实现，测量方法选择的正确与否，直接关系到测量结果的准确度，也关系到测量工作的经济性和可行性。对于各种测量方法，可从不同角度进行分类。

1. 按测量手段分类

按测量手段可分为直接测量、间接测量和组合测量。

(1) 直接测量

不需经过任何计算，直接由测量仪器的读数获取被测量的值，这种测量方法称为直接测量。例如用电压表和电流表测量电压和电流、用欧姆表测量电阻等。直接测量的优点是测出的量值就是被测量本身的值，测量过程简单迅速，是工程测量中广泛应用的测量方法。缺点是受仪器基本误差的限制，测量准确度不高。

(2) 间接测量

根据被测量和其他量的函数关系，先通过直接测量得到其他量，然后按函数关系式计算出被测量的值，这种测量方法称为间接测量。例如，用伏安法测量电阻或测量电功率、用测量电阻上的电压来得到电流等。间接测量的手续较多，当被测量不便于直接测量或缺少直接测量仪器时，可以采用间接测量的方法。

(3) 组合测量

如果被测量与多个未知量有关，那么一次测量无法求得被测量的值，此时可通过改变测量条件进行多次测量，根据被测量与未知量的函数关系列出方程组来求解，进而得到被测量值，这种测量方法称为组合测量。组合测量的操作手续复杂，花费时间较长，多用于科学实验或一些特殊场合。

2. 按测量方式分类

按测量方式分类可分为偏差式测量、零位式测量与微差式测量。

(1) 偏差式测量

用仪表指针偏转的大小（即偏差）来确定被测量的值，这种测量方法称为偏差式测量。例如用指针式电压表和电流表测量电压和电流等。偏差式测量仪表的刻度事先用标准器具进行分度。在测量时，按照仪表指针在标尺上的示值，读出被测量的值。偏差式测量的优点是测量过程简单迅速，是工程测量中广泛应用的测量方法，其缺点是测量准确度较低。

(2) 零位式测量

将被测量与已知标准量在比较仪器中进行比较，用指零仪表指示仪器的平衡状态，在指零仪表指零时，被测量与已知标准量相等，由已知标准量确定被测量的值，这种测量方法称为零位式测量。例如，用直流电桥测量电阻、用电位差计测量电动势等。零位式测量的优点



是可以获得很高的测量精度，缺点是已知标准量必须连续可调，仪器造价高，测量过程用时较长，不适于测量变化较快的量。

(3) 微差式测量

先将被测量与同其量值只有微小差值的已知标准量进行比较，再用偏差式测量法测量此差值，由此确定被测量的值，这种测量方法称为微差式测量。设 X 为被测量， N 为标准量， Δ 为二者之差，则 $X = N + \Delta$ 。例如用不平衡电桥测量电阻的变化量、电压的比较测量等。微差式测量适用于被测量变化较快、变化范围相对较小的场合，其优点是不需要调整标准量，测量速度快，测量精度高，特别适用于在线实时测量。

3. 按测量性质分类

按测量性质可分为时域测量、频域测量和数据域测量。

(1) 时域测量

时域测量用于测量交流电压、交流电流等随时间变化的量。对其稳态值、有效值，可用电压表、电流表等测量；对其瞬时值，可通过示波器观测其幅值随时间变化的关系。

(2) 频域测量

频域测量用于测量信号所包含的频率分量、电路或系统的频率特性。通过频域测量可得出信号的频谱曲线、电路的频率特性曲线，以分析被测量幅值与频率之间的关系。

(3) 数据域测量

数据域测量是指对数字量进行的测量。用具有多个输入通道的逻辑分析仪，可同时观测多位并行数据。如观测微处理器地址线、数据线上的信号，既可显示多路信号的时序波形，也可用“0”、“1”表示其逻辑状态。

任务2 知识引领——测量误差的基本知识

任何物理量必然存在一个真实的数值，这个数值称为真值。真值是在研究某物理量时在一定条件下严密定义的量值，一般来说是难以准确测量出来的。一切测量的目的都是为了尽可能准确可靠地获得真值，但由于人们对客观规律认识的局限性、测量工具的不准确、测量手段的不完善，以及测量过程中可能出现的疏忽和失误，都会使测量值与真值不同。测量值与被测量真值之差就是测量误差。

知识 2.1 测量误差的分类

测量误差是多种因素共同作用的结果，测量误差的产生是不可避免的，只能尽可能地减小测量误差，如果测量误差在许可范围之内，就认为测量结果是正确的。根据误差的性质和特点，测量误差可分为随机误差、系统误差和粗大误差三类。

(1) 随机误差

随机误差是指在对同一被测量进行多次测量过程中，绝对值和符号都以不确定方式变化的误差。每次出现的误差都是偶然的，没有复现性，因此随机误差也称偶然误差。



随机误差是由那些对测量值影响微小又互不相关的多种因素共同作用造成的,例如,电磁干扰或电源电压的频繁波动、测量仪器或电路元器件的噪声、测量人员感觉器官的偶然变化等。一次测量的随机误差没有规律,但足够多次重复测量所出现的随机误差服从统计规律,因此可采用多次测量取算术平均值的方法来消除随机误差。

(2) 系统误差

系统误差是指在对同一被测量进行多次测量过程中,绝对值和符号保持恒定或在条件改变时按某种确定规律变化的误差。造成系统误差的原因很多,例如,仪器标度的偏差、使用时仪器零点未调准、环境条件的变化、测量方法不当等造成的误差。

系统误差的特点是,测量条件一经确定,误差即为一确定数值,用多次测量取平均值的方法不能改变系统误差的大小。对于系统误差主要应从产生误差的根源上来消除,或采取对测量值进行修正、或采取相应补偿措施的方法,来减小系统误差对测量结果的影响。

(3) 粗大误差

粗大误差是指在对同一被测量进行多次测量过程中,测量值明显偏离实际值的误差。粗大误差产生的原因可能是操作或读数错误、仪器的不稳定或出现故障、测量条件的突然变化等。由于粗大误差是在不正常的情况下出现的,测量数据误差很大,甚至是错误的,因此粗大误差也称为差错。这样的测量数据称为坏值,应剔除不用。

知识 2.2 测量误差的来源

在测量工作中,对于误差的来源要认真分析,采取相应措施,以减小各种测量误差。电子测量误差的来源是多方面的,按产生的主、客观因素可分为人为误差和非人为误差。人为误差主要包括人员误差、方法误差、使用误差;非人为误差主要有仪器误差、环境误差等。

(1) 仪器误差

仪器误差即仪器的固有误差,这是由于测量仪器及其附件本身不完善而引起的误差。例如,电桥中标准电阻误差、衰减电路分压比误差、仪器零位偏移、标度不准确、仪器的非线性等引起的误差均属仪器误差。仪器误差可通过在测量结果中加修正值(包括利用修正公式或修正曲线)的方法进行修正。

(2) 环境误差

环境误差又称影响误差,是由于各种环境因素与要求条件不一致所造成的误差。例如,温度、湿度、电源电压、电磁场干扰等影响所引起的误差。为了克服环境误差,应注意仪器设备使用的环境条件。要求严格时,测量应在恒温、恒湿和电磁屏蔽的专门实验室中进行。也可通过对仪器设备进行环境测试,确定各种环境因素的影响程度,从而对测量结果进行适当的修正,以减小环境误差。

(3) 方法误差

方法误差又称理论误差,是由于测量方法不合理或采用的近似公式不适当所造成的误差。例如,用普通万用表测量电路中高阻值电阻两端的电压,由于万用表电压挡内阻不高,形成分流作用而引起的误差即为方法误差。对方法误差,可通过理论分析来进行修正,或采用更合理、更科学的测量方法来消除误差。



(4) 使用误差

使用误差又称操作误差。是由于在使用仪器过程中未严格遵守操作规程而引起的误差。例如,仪器未按规定安放、零点未调准、接地不良、测试接线太长、未考虑阻抗匹配、仪器操作使用方法不当、读数的视差等,都会产生使用误差。为了避免使用误差,必须严格遵守仪器的安装调整要求和操作规程,熟练掌握测量操作方法。

(5) 人员误差

人员误差是由测量者的分辨能力、固有习惯、工作态度、熟练程度等因素引起的误差。这说明测量人员要经过严格训练,具有较高的测量操作技能,并要养成专心致志、一丝不苟的工作作风,这样才能减小测量中的人员误差。

知识 2.3 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法一般有两种,即绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

测量值与被测量真值之差称为绝对误差。设被测量的真值为 A_0 , 测量值为 Y , 则绝对误差 ΔY 可以表示为

$$\Delta Y = Y - A_0 \quad (1-1)$$

测量值是指由测量所得到的被测量值,即测量器具的示值。由于真值 A_0 一般无法得到,通常用约定真值(实际值) A 来代替真值 A_0 , 即

$$\Delta Y = Y - A \quad (1-2)$$

通常是把高一等级的标准器具所复现的量值作为约定真值。

在实际测量中还要用到修正值,修正值 C 是与绝对误差大小相等、符号相反的值,即

$$C = -\Delta Y$$

计量器具的修正值,可通过检定由高一级标准器具给出,它可以是表格、曲线或函数表达式等形式。利用修正值对测量值进行修正,即可得到被测量的实际值。

$$A = Y + C \quad (1-3)$$

例如,某电流表测得的电流示值为 0.8mA , 查该电流表的检定证书得知,如果该电流表在 0.8mA 附近的修正值为 -0.02mA , 那么被测电流的实际值为

$$A = Y + C = 0.8\text{mA} + (-0.02\text{mA}) = 0.78\text{mA}$$

在实际测量中,可通过加修正值的方法来提高测量的准确度。

绝对误差有计量单位,其大小和符号分别表示测量值偏离实际值的程度和方向,但绝对误差不使用说明不同量值的测量质量。

2. 相对误差

为了更确切地反映出不同量值的测量质量,就要用相对误差来表示。

测量的绝对误差与被测量的约定值之比称为相对误差,常用百分数来表示。约定值可以是实际值 A 、示值 Y 或仪器的满量程值 Y_m 。因此,相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差和引用误差。



(1) 实际相对误差 γ_A

实际相对误差用绝对误差 ΔY 与被测量的实际值 A 的百分比来表示, 即

$$\gamma_A = (\Delta Y / A) \times 100\% \quad (1-4)$$

(2) 示值相对误差 γ_y

示值相对误差用绝对误差 ΔY 与被测量的示值 Y 的百分比来表示, 即

$$\gamma_y = (\Delta Y / Y) \times 100\% \quad (1-5)$$

对于一般的工程测量。用 γ_y 来表示测量的准确度较为方便。

(3) 引用误差 γ_m

引用误差是用测量器具的绝对误差与其特定值的百分比来表示。特定值又称为引用值, 通常取测量器具的满量程值 Y_m , 即

$$\gamma_m = (\Delta Y / Y_m) \times 100\% \quad (1-6)$$

引用误差常用于表示仪器仪表, 特别是电工仪表的误差。实际上引用误差给出了仪表各量程内绝对误差不应超过的最大值。即

$$\Delta Y = \gamma_m \cdot Y_m \quad (1-7)$$

由此可见, 为了减少测量中仪表的示值误差。在选择仪表的量程时, 应尽量使示值靠近满刻度值, 一般应使示值指示在仪表满刻度值的 $2/3$ 以上区域内。

应注意, 这个原则对测量电阻的模拟式欧姆表 (如指针式万用表的欧姆挡) 就不适用了, 因为欧姆表的设计和检定, 均以中值电阻为基础, 因此, 其量程的选择应以仪表指针偏转到最大偏转角度的 $1/3 \sim 2/3$ 区域为宜。

常用电工仪表的准确度等级可分为 0.1 、 0.2 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.5 、 5.0 共七个级别, 这些准确度等级就是按照引用误差来划分的。例如, 0.5 级的仪表, 其 $\gamma_m \leq \pm 0.5\%$, 并在仪表刻度盘上标以 0.5 级的标志, 若仪表有几个量程, 则所有量程上引用误差均为 $\pm 0.5\%$ 。显然, 各量程的绝对误差是不一样的。

仪器的准确度等级和基本误差对照见表 1-1。

表 1-1 仪器的准确度等级和基本误差对照表

仪器准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差 (%)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

【例 1.1】 检定一个 1.5 级、满量程值为 $10V$ 的电压表, 若在 $5V$ 处的绝对误差最大值为 $0.12V$ (即其他刻度处的绝对误差均小于 $0.12V$), 问该仪表是否合格?

解: 根据式 (1-7), 可求得该表的引用误差为

$$\gamma_m = \Delta Y / Y_m = 0.12V / 10V = 1.2\%$$

因为 $\gamma_m = 1.2\% < 1.5\%$, 因此该表是合格的。

【例 1.2】 有一实际值为 $220V$ 的电源, 分别用一个量程 $250V$ 、 1.0 级和一个量程 $600V$ 、 0.5 级的电压表测量, 求对应的最大相对误差。

解: $\gamma_1 = \Delta Y_1 / A = \gamma_{m1} \times Y_{m1} / A = (1.0\% \times 250) / 220 = 1.14\%$

$$\gamma_2 = \Delta Y_2 / A = \gamma_{m2} \times Y_{m2} / A = (0.5\% \times 600) / 220 = 1.36\%$$

从计算结果可看出, 采用一个等级高 (准确度高) 的电压表所测得的数据反而不如采用一个等级低 (准确度低) 的电压表测得的数据准确。之所以会产生这样的结果, 是因为这两



个仪表的量程不一样。因此在测量时，一般要求被测量的值应为所用量程值的 $2/3$ 以上。

3. 测量结果的评定

对测量结果通常采用正确度、精密度和精确度来评定。

(1) 正确度

正确度是指测量值与真值接近的程度，它反映系统误差的影响程度。

(2) 精密度

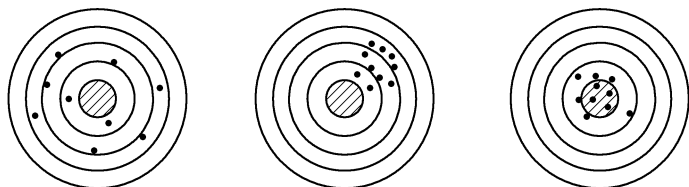
精密度是指测量值相互之间接近的程度，它反映随机误差的影响程度。

(3) 精确度

精确度又称准确度，简称精度，它反映系统误差和随机误差的综合影响程度。精确度高，表明测量结果的精密度和正确度均高。

为了便于理解，我们以打靶为例说明测量结果的评定，如图 1-1 所示。若 10 发子弹均分散射在靶心四周，称为精密度低，正确度高；若 10 发子弹密集地射中靶子但均偏离靶心一边，称为精密度高，正确度低；若 10 发子弹密集地打中靶心，则精密度、正确度均高，也就是说精确度高。

测量结果也是如此，若多次测量的数据很接近时称为精密度高，若这些数据都接近于真值，称为正确度高。若测量的精密度和正确度都高，称为测量的精确度高。



(a) 精密度低、正确度高 (b) 精密度高、正确度低 (c) 精密，正确度均高

图 1-1 测量结果的评定示意图

任务 3 知识引领——测量结果的数据处理

测量获得大量数据后，如何处理这些数据以减小测量误差，并得出最佳的测量结果，是测量工作中最后的也是最重要的一项任务。测量结果的数据处理包括数据的整理、计算和分析等工作。在数据处理过程中，要进行去粗取精，去伪存真，通过整理、计算和分析得出正确的结论。

知识 3.1 有效数字的正确表示

由于测量过程中不可避免地存在误差，因此测量数据也含有误差，不可能完全准确，由于测量数据计算出来的值都是近似值。同时计算时还经常用到 π 、 $\sqrt{2}$ 等无理数，它们都要取近似值，所以最终数据总是近似的。因此测量数据位数应取得适当，不必太多，也不宜太少，这就提出了有效数字的问题。



(1) 有效数字的概念

有效数字是那些能够正确反映测量准确度的数字，是指从一个数据左起第一个非零数字开始，直到最右边的一个数字（包括“0”在内）。有效数字的最末一位是近似数字，它可以是测量中估计读出的近似数字，也可以是按规定修正后的近似数字。测量结果的有效数字是指实际能够测量到的数字，通常包括全部准确数字和一位不确定的可疑数字。

(2) 数据中“0”的作用

数字“0”在数据中可能是有效数字，也可能不是有效数字。在非零数字左边的0不是有效数字，仅用于数字定位，例如，0.03080MHz，前面的两个“0”不是有效数字，单位若换成kHz，为30.80kHz，则前面的“0”就不起作用了。在数字中间和右边的零代表有效数字，数字末尾的“0”很重要。例如，30.8的有效数字为3位，表示测量结果精确到十分位；30.80的有效数字为4位，表示测量结果精确到百分位。

(3) 有效数字的位数

有效数字的位数是由所使用的测量仪器的准确度和能读出的数字位数来确定。例如，已知某电压表的测量误差为 $\pm 0.05\text{V}$ ，若电压测量值为3.852V，则应取3.85V，即取3位有效数字。通常作测量记录时，每一个数据只能最末一位数字是估计读数，而其他各位数字都必须是准确可靠的。例如，电压表测得的电压为12.25V，表明仪表刻度精确到小数点后的第一位，此前的数字都是准确的，小数点后第二位是估计的。

知识 3.2 有效数字的舍入规则

测量数据都是近似值，在数据处理中，当有效数字的位数确定后，需要对超出有效数字的位数进行舍入处理。常用的“四舍五入”规则是不合理的，因为5是1~9的中间数字，也应该有舍有入才能平衡。所以在测量技术中规定，小于5舍去，大于5进位，等于5时采取偶数法则。也就是说，以保留数字的末位为基准，它后面的数字大于5时，末位数字加1，小于5时舍去；恰好等于5时，若5后有非0数字，则可以进位；若5后为0，则将末位凑成偶数，即末位原为奇数时加1，原为偶数时不加。

为了帮助记忆，归纳成如下口诀：

4舍6入5待定，5后非0则可进，

5后为0前位定，偶则舍去奇则进。

例如，将下列数字保留3位有效数字。

① 12.842→12.8（因为 $4 < 5$ ）；

② 12.862→12.9（因为 $6 > 5$ ）；

③ 12.852→12.9（因为5后非0）；

④ 12.850→12.8（因为8是偶数，5舍）；

⑤ 12.750→12.8（因为7是奇数，5入）。

知识 3.3 测量数据的运算法则

当需要对几个测量数据进行运算时，要考虑有效数字保留多少位的问题，以便不使运算



过于麻烦而又能正确反映测量的准确度。保留的位数原则上取决于各数据中准确度最低的那一项。

(1) 加、减法运算

加、减法运算采用小数点对齐法则,数据的保留位数以小数点后位数最少的数为准,各项无小数点则以有效位数最少者为准,其余各数可多取一位,舍入处理后再进行计算。运算结果的小数点位数应与参与运算的小数点位数最少的相同。例如,三个测量数据相加:

$$15.4 + 4.554 + 0.286 = 15.4 + 4.55 + 0.29 = 20.24 \approx 20.2$$

应尽量避免两个相近数相减,若非减不可时,则应多取几位有效数字。

(2) 乘、除法运算

乘、除法运算采用最少有效数字法则,数据的保留位数以有效数字位数最少的数为准,其余各数字可多取一位,舍入处理后再进行计算。运算结果的有效数字位数应与参与运算的有效数字位数最少的相同。例如:

$$4.327 \times 1.1 = 4.33 \times 1.1 = 4.763 \approx 4.8$$

$$7.785 \div 0.02 = 7.8 \div 0.02 = 390 \approx 3.9 \times 10^2$$

为了保证必要的精度以及再参与下一步的运算,最终运算结果也可以比有效数字位数最少者多保留一位有效数字。

(3) 乘方、开方及对数运算

乘方与开方的运算结果应比原数据多保留一位有效数字;取对数运算前后的有效数字位数应相等。

任务4 知识引领——测量仪器的基本知识

测量仪器是用于测量的器具或装置。采用电子技术测量电量或非电量的测量仪器统称为电子测量仪器。它包括各类指示仪器、比较仪器、图形显示仪器、记录仪器、辅助仪器以及传感器和变送器等。

知识4.1 电子测量仪器的分类

电子测量仪器品种繁多,按用途分类可分为专用仪器和通用仪器两大类。专用仪器是为特定目的而专门设计制造的仪器,只适用于特定的测量对象和测量条件。通用仪器是适用面广、灵活性好,能用于各种电子测量场合的仪器。

电子测量仪器按测量功能可分为以下几类。

(1) 测量用信号发生器

用于提供测量所需的各种波形信号。如低频信号发生器、高频信号发生器、脉冲信号发生器、函数信号发生器和噪声信号发生器等。

(2) 信号测量分析仪器

用于对各种电信号的量值进行测量和分析,包括时域、频域和数字域测量,如电压表、示波器、电子计数器、失真度仪、频谱分析仪和逻辑分析仪等。



(3) 电路特性测量仪器

用于对电路或系统的各种特性进行测量或显示电路的特性曲线，如频率特性测试仪、阻抗测试仪、网络分析仪等。

(4) 电子元器件测量仪器

用于对各种电子元件的参数进行测量或显示元件的特性曲线，如万用电桥、RLC测试仪、高频Q表、半导体管特性图示仪、集成电路测试仪等。

(5) 电波特性测试仪器

用于对电波的传播特性、电磁场强度和电磁干扰强度等参量进行测量，如测试接收机、场强测量仪、干扰测试仪等。

(6) 辅助测量仪器

用于配合上述各种仪器对被测信号进行相应处理、显示或记录，以便更充分地发挥上述仪器的作用。如辅助使用的各种放大器、衰减器、检波器、滤波器、变频器、显示器、记录仪，以及稳压电源等。

知识 4.2 电子测量仪器的误差

在电子测量中，由于电子测量仪器本身性能不完善所引起的误差，称为电子测量仪器的误差，通常用最大允许误差来表示，它是由相关标准、技术规范所规定的仪器仪表误差不应超过的最大范围，仪器仪表的误差有以下4种。

(1) 基本误差

基本误差又称固有误差，是在规定的一组影响量（如环境温度、相对湿度、大气压力、电源电压和频率，电磁场干扰等）的基准条件下，仪器仪表的允许误差。

(2) 工作误差

工作误差是在额定工作条件下仪器仪表的允许误差。

(3) 附加误差

附加误差又称影响误差，是在某一规定条件改变时所产生的误差，即当一个影响量在额定工作条件范围内变化，而其他影响量均处于基准条件时的允许误差，如温度附加误差、电源电压附加误差、电磁干扰附加误差等。

(4) 稳定误差

稳定误差又称为漂移，是在各影响量均保持恒定时，仪器仪表在规定时间内发生变化的允许误差，它表示了仪器仪表的稳定性。

电子测量仪器的允许误差既可采用绝对误差，也可采用相对误差或者采用二者结合的形式表示，它也可以是以“基本误差 + 附加误差”的形式给出。

知识 4.3 电子测量仪器的性能指标

电子测量仪器的性能指标很多，其中主要包括频率范围、准确度、灵敏度、线性度、输入阻抗、稳定性等。



1. 频率范围

频率范围又称带宽,是指保证测量仪器的其他指标正常时的有效频率范围。通常用其上、下限频率来表示。

2. 准确度

准确度又称精度,是指测量仪器的读数或其示值与被测量真值相一致的程度。测量仪器的精度高,表明测量误差小。

3. 输入阻抗

测量仪器的输入阻抗对测量结果会产生一定的影响,输入阻抗一般用输入电阻和输入电容来表示。应该指出,对于信号输出类仪器,还规定有输出阻抗,在高频和微波测量时,还必须注意输入、输出阻抗的匹配。

4. 灵敏度

灵敏度是表示仪器仪表对被测量变化的敏感程度,定义为测量仪表的指示值(指针的偏转角度、数码的变化等)增量 Δy 与被测量增量 Δx 之比。灵敏度的另一种表述方式叫作分辨力(或分辨率),是指测量仪表所能区分的被测量变化的最小值,在数字式仪表中经常使用,同一仪器不同量程的分辨力不同。

5. 线性度

线性度是表示仪器仪表的刻度(示值)随被测量变化的规律。如果两者关系成比例变化,即为一直线,则称之为线性刻度特性,否则称为非线性刻度特性,如常用直流电压表和电流表具有线性刻度特性,而指针式欧姆表,具有非线性刻度特性。

6. 稳定性

稳定性是指在其他外界条件恒定不变的情况下,在规定时间内,仪器仪表保持示值不变的能力。稳定性又分为短期稳定性和长期稳定性。

任务5 应用实训——误差计算与数据处理实训

实训 5.1 测量误差计算实训

1. 实训目的

- (1) 加深测量误差的基本概念;
- (2) 掌握测量误差的计算方法。



2. 实训内容

(1) 测量误差的计算

已知测量值和实际值，计算测量误差。具体数值由实训老师给出，进行5项误差计算，将计算数据填入表1-2中。

表1-2 测量误差的计算数据

序 号	测 量 值	实 际 值	绝 对 误 差	实际相对误差	示值相对误差
1					
2					
3					
4					
5					

(2) 仪器误差的计算

已知仪器的精确度和量程，计算仪器所产生的最大误差。具体数值由实训老师给出，进行5项误差计算，将计算数据填入表1-3中。

表1-3 仪器误差的计算数据

序 号	仪器的精度	仪器的量程	仪器基本误差	最大绝对误差	最大相对误差
1					
2					
3					
4					
5					

实训 5.2 测量数据处理实训

1. 实训目的

- (1) 加深有效数字的基本概念；
- (2) 掌握测量数据的处理方法。

2. 实训内容

(1) 有效数字的取舍

按有效数字取舍规则进行有效数字的取舍，原始测量数据和要求保留的位数由实训老师给出，进行5组取舍处理，将处理结果填入表1-4中。



表 1-4 有效数字的取舍处理

序 号	原始测量数据	要求保留位数	处理后的数据	取舍依据原则	相 关 说 明
1					
2					
3					
4					
5					

(2) 有效数字的运算

按有效数字运算规则进行加、减和乘、除运算，具体测量数据由实训老师给出，各进行 5 项运算，将运算结果填入表 1-5 和表 1-6 中。

表 1-5 有效数字的加、减运算

序 号	测量数据 1	测量数据 2	测量数据 3	应保留位数	运 算 结 果
1					
2					
3					
4					
5					

表 1-6 有效数字的乘、除运算

序 号	测量数据 1	乘或除运算	测量数据 2	应保留位数	运 算 结 果
1					
2					
3					
4					
5					

本项目小结

1. 电子测量，是以电子技术理论为依据，以电子测量仪器为手段，对各种电量、电信号及电路元器件的特性和参数进行测量，还可以通过各种传感器对非电量进行测量。电子测量广泛用于生产、科研的各个领域。

2. 电子测量的内容包括电能量的测量，电路元器件参数的测量，电信号特征的测量，电路参数的测量，特性曲线显示测量。电子测量的特点是，频率范围宽，量程范围广，测量准确度高，测量速度快，易于实现遥测，可实现测量自动化。

3. 测量方法可从不同角度进行分类：按测量手段分类，可分为直接测量、间接测量和组合测量。按测量方式分类，可分为偏差式测量、零位式测量与微差式测量。按被测量性质



分类,可分为时域测量、频域测量和数据域测量。

4. 测量误差是测量结果与被测量真值之差。测量误差按其性质可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。对测量结果的评定,常采用正确度、精密度和精确度。正确度指测量值与真值接近的程度,反映系统误差的影响;精密度指测量值相互之间接近的程度,反映随机误差的影响;精确度反映系统误差和随机误差的综合影响。

5. 测量误差的来源包括仪器、环境、方法、使用、人员五个方面。测量误差的表示方法有绝对误差和相对误差,绝对误差只说明误差的大小和方向,相对误差可说明测量的准确程度。电子测量仪器的误差有基本误差、附加误差、工作误差、稳定误差。

6. 电子测量所使用的仪器有多种,可分为专用仪器和通用仪器。其中,通用仪器的灵活性好,应用面广,是本书学习和训练的重点。电子测量仪器按测量功能可分为测量用信号发生器,信号测量分析仪器,电路特性测量仪器,元器件测量仪器,电波特性测试仪器,辅助测量仪器。

7. 有效数字是那些能够正确反映测量准确度的数字,也就是实际能够测量到的数字,通常包括全部准确数字和一位不确定的可疑数字。测量结果有效数字的位数应与测量使用的仪器精确度相一致。

8. 当需要对几个测量数据进行运算时,要考虑有效数字保留多少位的问题,保留的位数原则上取决于各数据中准确度最低的那一项。加减法运算采用小数点对齐法则,乘除法运算采用最少有效数字法则。

项目1 思考题

1. 什么是测量和电子测量? 电子测量主要包括哪些内容?
2. 电子测量具有哪些特点? 电子测量的基本方法有哪些?
3. 什么是随机误差? 如何消除随机误差的影响?
4. 什么是系统误差? 如何减小系统误差的影响?
5. 什么是测量误差? 测量的误差来源主要有哪些?
6. 测量误差的表示方法有哪些? 其含义是什么?
7. 测量结果的评定指标有哪些? 其含义是什么?
8. 什么是有效数字? 如何确定测量结果的有效数字位数?
9. 有效数字的舍入规则如何规定?
10. 测量数据的运算规则有哪些?
11. 什么是电子测量仪器? 电子测量仪器如何分类?
12. 什么是电子测量仪器误差? 电子测量仪器的误差有哪些?
13. 电子测量仪器的技术指标有哪些?

项目 2 电压测量仪器及应用



本项目任务目标

1. 学习电压测量的基本知识：应了解电压测量的特点、电压测量仪器的分类、交流电压的基本参数、电平的概念及测量。
2. 学习模拟电子电压表的相关知识：应了解不同类型模拟电子电压表的结构特点和工作原理、学会模拟电子电压表的选择与使用。
3. 学习数字电压表的基本知识：应了解数字电压表的组成，模拟/数字转换器的常用类型及工作原理，数字电压表的主要技术指标。
4. 学习数字万用表的相关知识：应了解数字万用表的组成、主要功能和性能指标，学会数字万用表的测量使用方法。
5. 进行电压测量的应用实训：通过训练掌握直流稳压电源性能测量方法，学会不同波形电压的换算，掌握用数字万用表测量电子元器件的基本技能。

任务 1 知识引领——电压测量的基本知识

电压是表征电信号能量的三个基本参数（电压、电流、功率）之一，信号的其他参数也是通过电压测量获得其量值，因此电压测量是电子测量中最常用、最基本、最重要的内容。

知识 1.1 电压测量的特点及要求

电压测量主要是对直流电压、正弦波电压的稳态值以及其他典型的周期性非正弦波电压参数的测量。电压测量的特点及要求如下。

1. 量值范围宽

被测电压的量值范围很宽，小到几纳伏，大到上万伏，电压可从 $10^{-9} \sim 10^5 \text{V}$ ，这就要求电压表应具有相当宽的量程，以适应不同量值电压的测量要求。测量时，应根据被测电压的大小合理选择电压表的量程。



2. 频率范围宽

被测电压的频率范围很宽,除直流外,频率范围可从 $10^{-5} \sim 10^9 \text{ Hz}$ (GHz),这就要求电压表应具有足够宽的频率范围,以适应不同频率电压的测量要求。测量时,应根据被测电压的频率合理选择电压表的类型。

3. 测量精度高

由于电压测量的基准是直流标准电池,在直流电压测量中,各种分布参数的影响又极小,因此直流电压的测量可获得很高的精度,如数字式直流电压表可达 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级,而交流电压表一般只能达到 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 量级。

4. 输入阻抗高

测量电压时,电压表与被测电路并联,其输入阻抗可视为被测电路的额外负载。为了尽量减小电压表的接入对被测电路的影响,要求电压表应有足够高的输入阻抗,即输入电阻应尽量大,输入电容应尽量小。

5. 抗干扰能力强

电压测量很容易受到各种外界电磁干扰,干扰会对灵敏度高的电压表产生较大影响,引起明显的测量误差,所以要求电压表应具有较强的抗干扰能力。测量时,还要采取相应措施,尽量减小外界电磁干扰。

6. 电压波形种类多

被测电压的波形是多种多样的,除了正弦波以外,还有失真的正弦波和各种非正弦波,如方波、三角波、锯齿波、脉冲波、调制波和噪声波等。测量时,应根据被测电压的波形和电压表的类型来确定被测电压的量值。

知识 1.2 电压表的分类

电压测量仪器的种类很多,通常采用的是各种电压表。在电子测量中,对于直流电压、工频 (50Hz) 电压和要求不高的低频 (几百 Hz) 电压测量时,可以使用万用表的电压挡,其他交流电压的测量都要使用电子电压表。按照测量结果的显示方式不同,电子电压表可分为模拟式电压表和数字式电压表两大类。

1. 模拟式电压表

模拟式电压表即指针式电压表,它用磁电式直流电流表作为指示器来显示测量结果,并在表盘上以电压或分贝进行刻度。模拟式电压表可从以下几方面进行分类。

(1) 按工作频率分类

按工作频率可分为低频电压表 (1MHz 以下)、视频电压表 (30MHz 以下)、高频电压表 (300MHz 以下)、超高频电压表 (300MHz 以上)。



(2) 按测量电压量级分类

按测量电压量级可分为电压表（基本量程为 V 量级）、毫伏表（基本量程为 mV 量级）、微伏表（基本量程为 μV 量级）。

(3) 按电路组成分类

按电路组成可分为放大 - 检波式、检波 - 放大式、热电变换式、外差式电压表等。

(4) 按准确度等级分类

按准确度等级可分为 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.5 级、5.0 级等。

(5) 按检波原理分类

按检波原理可分为峰值电压表、平均值电压表和有效值电压表。

(6) 按刻度特性分类

按刻度特性可分为线性刻度电压表和非线性刻度电压表。

模拟式电压表电路结构简单，测量准确度较高，价格相对较低。因此在电压测量中，模拟式电压表一直占有重要的地位。

2. 数字式电压表

数字式电压表是将被测的模拟电压通过模拟/数字（A/D）转换器变换成数字量，以十进制数字显示被测电压值。数字式电压表可从以下几方面进行分类。

(1) 按测量功能分类

按测量功能可分为直流数字电压表和交流数字电压表。

(2) 按模拟/数字转换方式分类

按模拟/数字转换方式可分为比较式、斜坡式、积分式、复合式数字电压表。

(3) 按交流/直流变换原理分类

按交流/直流变换原理可分为峰值型、平均值型和有效值型数字电压表。

(4) 按显示位数分类

按显示位数分有 3 位、3 位半、4 位、4 位半、5 位、5 位半、6 位等多种位数的数字电压表。

数字式电压表具有测量精度高、测量速度快、量程范围宽、显示位数多、分辨率高、无读数误差、易于实现测量自动化等特点，因此在电压测量中日益占据了重要的地位。

知识 1.3 交流电压的幅值参数

交流电压除了用具体的函数关系式表达其随时间的变化规律外，其幅值通常还可以用峰值、峰 - 峰值、平均值、有效值等参数来表征。

1. 峰值

周期性交流电压 $u(t)$ 在一个周期内偏离零电平的最大值称为峰值，用 U_p 表示。正、负峰值不相等时分别用 U_{p+} 和 U_{p-} 表示，正最大值与负最大值之差称为峰峰值，用 U_{p-p} 表示，如图 2-1 所示。

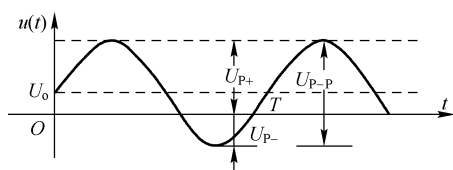


图 2-1 交流电压的峰值和峰 - 峰值

2. 平均值

交流电压 $u(t)$ 的平均值用 \bar{U} 表示, 它实质上就是周期性交流电压的直流分量 U_0 , 如图 2-1 中所示。正/负波形对称的周期性交流电压, 其平均值为零, 如图 2-2 (a) 所示。

在电子测量中, 交流电压的平均值通常是指整流 (也称检波) 以后的平均值, 又可分为半波整流平均值和全波整流平均值, 如图 2-2 (b)、(c) 中虚线所示。如不加说明时, 通常是指全波整流平均值。

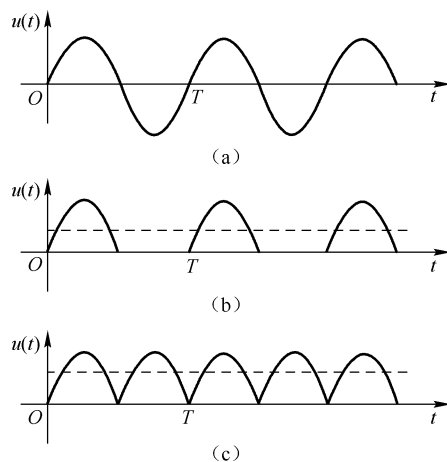


图 2-2 交流电压半波和全波整流后的波形

3. 有效值

交流电压的有效值用 U 表示, 它实质上是数学中的均方根值, 因此有时也写作 U_{rms} 。交流电压有效值的物理意义是: 在交流电压的一个周期内, 该电压在电阻负载上所产生的热能与一个直流电压在同一电阻上产生的热能相同时, 那么该交流电压的有效值就等于此直流电压。

4. 三者的关系

为表征同一交流电压的峰值、有效值和平均值之间的关系, 引入波形因数和波峰因数。

(1) 波形因数

波形因数 (又称波形系数) 用 K_F 表示, 定义为交流电压的有效值与平均值之比, 即

$$K_F = \frac{U}{\bar{U}} \quad (2-1)$$



(2) 波峰因数

波峰因数（又称波峰系数）用 K_p 表示，定义为交流电压的峰值与有效值之比，即

$$K_p = \frac{U_p}{U} \quad (2-2)$$

不同电压波形的 K_F ， K_p 值不同，表 2-1 列出几种常见交流电压的波形参数。

表 2-1 交流电压的波形参数

名 称	波形因数 K_F	波峰因数 K_p	有 效 值	平 均 值
正弦波	1.11	1.414	$\frac{U_p}{\sqrt{2}}$	$\frac{2U_p}{\pi}$
半波整流	1.57	2	$\frac{U_p}{2}$	$\frac{U_p}{\pi}$
全波整流	1.11	1.414	$\frac{U_p}{\sqrt{2}}$	$\frac{2U_p}{\pi}$
三角波	1.15	1.732	$\frac{U_p}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_p}{2}$
方波	1	1	U_p	U_p
锯齿波	1.15	1.732	$\frac{U_p}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_p}{2}$
白噪声	1.25	3	$\frac{U_p}{3}$	$\frac{U_p}{3.75}$

知识 1.4 电平的概念及测量

1. 电平的概念

电信号通过某一传输系统时，其功率或电压会发生相对变化，用来表示功率、电压的增加或者衰减的倍数，称为电平，电平的单位为贝尔（Bel），由于这个单位相对测量值较大，实际应用中常用贝尔的 1/10 作为单位；称为分贝，用 dB 表示。电平主要用于某些通信系统、电声系统以及噪声测试系统中。常用的电平有功率电平和电压电平两类，它们各自又可分为绝对电平和相对电平两种。

(1) 绝对功率电平 L_p

以 600Ω 电阻上消耗 1mW 的功率作为基准功率 P_0 ，任意功率与基准功率之比的对数称为绝对功率电平，其表达式为

$$L_p = 10 \lg \frac{P_x}{P_0} \text{ (dB)} \quad (2-3)$$

式中， P_x 为任意功率； P_0 为基准功率。

当 $P_x = 1\text{mW}$ 时， $L_p = 0\text{dB}$ ，称为零功率电平；当 $P_x > 1\text{mW}$ 时， L_p 为正值；当 $P_x < 1\text{mW}$ 时， L_p 为负值。因基准功率 P_0 为 1mW，所以绝对功率电平又可表示为

$$L_p = 10 \lg P_x \text{ (dB)} \quad (2-4)$$



(2) 相对功率电平 L'_p

任意两功率之比的对数称为相对功率电平, 其表达式为

$$L'_p = 10 \lg \frac{P_A}{P_B} \text{ (dB)} \quad (2-5)$$

式中, P_A 、 P_B 为任意两功率。

相对功率电平与绝对功率电平之间的关系是

$$L'_p = 10 \lg \frac{P_A}{P_B} = 10 \lg \frac{P_A}{P_0} \frac{P_0}{P_B} = (L_{pA} - L_{pB}) \text{ (dB)} \quad (2-6)$$

式中, L_{pA} 、 L_{pB} 为任意两功率的绝对功率电平。

由式 (2-6) 可以看出, 相对功率电平是两绝对功率电平之差。

(3) 绝对电压电平 L_U

当 600Ω 电阻上消耗 1mW 的功率时, 600Ω 电阻两端的电压为 0.775V , 此电压称为基准电压。任意电压与基准电压之比的对数称为该电压的绝对电压电平, 其表达式为

$$L_U = 20 \lg \frac{U_x}{0.775} \text{ (dB)} \quad (2-7)$$

式中, U_x 为任意两点的电压。

当 $U_x = 0.775\text{V}$ 时, $L_U = 0\text{dB}$, 称为零电压电平; 当 $U_x > 0.775\text{V}$ 时, L_U 为正电平; 当 $U_x < 0.775\text{V}$ 时, L_U 为负电平。

(4) 相对电压电平

任意两电压之比的对数称为相对电压电平, 其表达式为

$$L'_U = 20 \lg \frac{U_A}{U_B} \text{ (dB)} \quad (2-8)$$

式中, U_A 、 U_B 为任意两电压值。

绝对电压电平与相对电压电平的关系是:

$$L'_U = 20 \lg \frac{U_A}{U_B} = 20 \lg \frac{U_A}{0.775} \frac{0.775}{U_B} = (L_{UA} - L_{UB}) \text{ (dB)} \quad (2-9)$$

式中, L_{UA} 、 L_{UB} 为任意两电压的绝对电压电平。

由式 (2-9) 可以看出, 相对电压电平是两绝对电压电平之差。

(5) 功率电平与电压电平的关系

绝对功率电平与绝对电压电平的关系是:

$$\begin{aligned} L_p &= 10 \lg \frac{P_A}{P_B} = 10 \lg \frac{\frac{U_x^2}{R_x}}{\frac{U_x^2}{600}} \\ &= 10 \lg \left(\frac{U_x}{0.775} \right)^2 + 10 \lg \frac{600}{R_x} = L_U + 10 \lg \frac{600}{R_x} \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (2-10)$$

由式 (2-10) 可见, 当 $R_x = 600\Omega$ 时, 电阻 R_x 上的绝对功率电平等于它的绝对电压电平, 而当 $R_x \neq 600\Omega$ 时, 其绝对功率电平不等于它的绝对电压电平, 两者相差 $10 \lg (600/R_x)$ 。

2. 电平的测量

电平的测量与电压的测量相同, 通常电压表上都只有一条分贝刻度线, 由电平的定义可

知, 电平量程的扩大, 可以通过相应的交流电压表量程的扩大来实现, 电平的实际测量值应为表头指示分贝数再加上一个附加分贝值。附加分贝值的大小由电压量程的扩大倍数来决定。

例如, 某交流毫伏表的电平刻度线是以交流电压 1V 挡为基准刻度的, 其他各量程的附加分贝值见表 2-2。

表 2-2 电平测量的附加分贝值

量程扩大	1V	3V	10V	30V	100V	300V
附加分贝值	0dB	10dB	20dB	30dB	40dB	50dB
量程缩小	300mV	100mV	30mV	10mV	3mV	1mV
附加分贝值	-10dB	-20dB	-30dB	-40dB	-50dB	-60dB

任务 2 仪器介绍——模拟式电子电压表

模拟式电子电压表又称指针式电子电压表, 它采用磁电式直流电流表作为指示器。测量交流电压时, 先将交流电压进行检波 (又称整流) 转换成直流电压后, 再进行直流电压测量。根据电压表的结构组成及性能不同, 模拟式电子电压表有以下几种类型。

知识 2.1 放大 - 检波式电子电压表

1. 组成特点

放大 - 检波式电子电压表的组成框图如图 2-3 所示。它先将被测交流电压进行放大, 然后再进行检波, 最后由电流表指示读数。由于是先放大后检波, 故称为放大 - 检波式电子电压表。

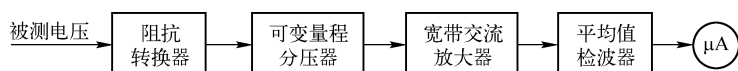


图 2-3 放大 - 检波式电子电压表的组成框图

这种电压表中的放大器, 采用的是多级宽带交流放大器, 灵敏度很高, 可达毫伏级, 但工作频率范围受到交流放大器通频带的限制而难以扩展, 一般为 20Hz ~ 10MHz, 通常称为低频毫伏表, 如 DA-16 型交流毫伏表。

这种电压表中的检波器, 采用的是平均值检波器, 平均值检波器输出的直流电压与输入交流电压的平均值成正比, 所以又把这种电压表称为均值电压表。它一般采用二极管全波桥式整流或半波整流电路作为检波器, 如图 2-4 所示。由于检波器是对大信号进行检波, 从而避免了对小信号检波所产生非线性失真的影响。由于平均值检波器本身的输入阻抗较低, 所以其前级通常加接阻抗变换器。

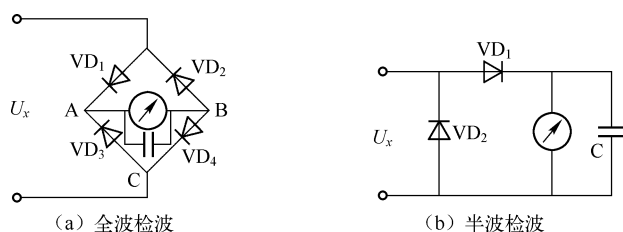


图 2-4 平均值检波电路

2. 刻度特性

放大-检波式电压表的表头刻度通常以正弦波有效值来定度。当测量正弦波电压时,电压表的读数 U_a 等于正弦波电压的有效值 U , 即 $U = U_a$; 当测量非正弦波电压时,电压表的读数没有直接意义,需要根据平均值检波器的特点,按照“平均值相等则读数相等”的原则求出平均值,再利用所测波形的有效值 U 与平均值 \bar{U} 之间的关系(波形因数 K_F)进行波形换算,得到非正弦波电压的有效值。换算公式为

$$\bar{U}_N = \bar{U}_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{K_F} = \frac{U_a}{1.11} = 0.9U_a \quad (2-11)$$

$$U_N = K_{FN} \bar{U}_N = 0.9K_{FN} U_a \quad (2-12)$$

式中, \bar{U}_N 、 \bar{U}_{\sim} 分别为非正弦波和正弦波电压的平均值; U_N 、 U_{\sim} 分别为非正弦波和正弦波电压的有效值; K_{FN} 为非正弦波的波形因数,见表 2-1。

【例 2.1】 用均值电压表测量正弦波、方波和三角波电压时,电压表读数均为 10V,试分别计算正弦波、方波和三角波的有效值。

解: 测量正弦波时, $U_{\sim} = U_a = 10\text{V}$

测量方波时, $U_{\square} = 0.9K_{F\square} U_a = 0.9 \times 1 \times 10 = 9\text{ (V)}$

测量三角波时, $U_{\Delta} = 0.9K_{F\Delta} U_a = 0.9 \times 1.15 \times 10 = 10.35\text{ (V)}$

用放大-检波式电压表测量非正弦电压时,如果直接将电压表的读数作为它的有效值,将会产生测量误差,称为波形误差。如测量方波时的波形误差为

$$\gamma_a = \frac{U_a - 0.9K_{F\square} U_a}{U_a} \times 100\% = (1 - 0.9 \times 1) \times 100\% = 10\%$$

知识 2.2 检波-放大式电子电压表

1. 组成特点

检波-放大式电子电压表的组成框图如图 2-5 所示。它先对被测交流信号进行检波,然后再进行直流放大,最后由电流表指示读数。由于是先检波后放大,故称为检波-放大式电子电压表。

这种电压表的频率范围不受内部放大器频率特性的限制,主要取决于检波器的频率响应。如果采用超高频检波二极管,工作频率可从 20Hz 直达 1GHz 以上,故称之为高频电压表或超高频电压表。由于采用了先检波后放大的形式,所以这种电压表的灵敏度受检波器的

非线性以及直流放大器零点漂移和噪声的影响,使其灵敏度受到限制,约为 0.1V。

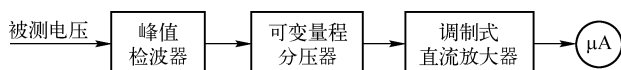


图 2-5 检波-放大式电子电压表的组成框图

为解决这一问题,通常采用调制式(斩波式)直流放大器,即通过调制器(斩波器)先将待放大的直流电压变为交流电压,经交流放大器放大后再由解调器转换为直流电压,这样就有效地解决了一般直流放大器存在的增益与零点漂移的矛盾,可使灵敏度达到毫伏级,同时噪声也得到了抑制,如 DA-22 型超高频毫伏表。

这种电压表中的检波器采用的是峰值检波器,峰值检波器输出的直流电压与输入交流电压的峰值成正比,所以又把这种电压表称为峰值电压表。一般峰值检波器电路如图 2-6 (a) 所示,若将两个峰值检波器组合在一起,可构成双峰值检波器,其输出的直流电压与输入交流电压的峰-峰值成正比,输出电压高一倍,电路如图 2-6 (b) 所示。

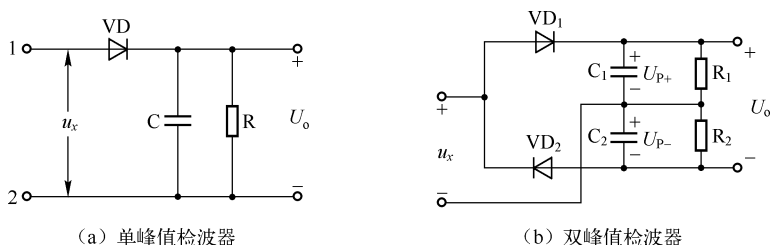


图 2-6 峰值检波器电路

2. 刻度特性

检波-放大式电压表的表头刻度通常也是以正弦波有效值来定度的。当测量正弦波电压时,电压表的读数 U_a 等于正弦波电压的有效值 U , 即 $U = U_a$; 当测量非正弦波电压时,电压表的读数没有直接意义,需要根据峰值检波器的特点,按照“峰值相等则读数相等”的原则求出峰值,再利用被测波形的峰值 U_p 与有效值 U 之间的关系(波峰因数 K_p)进行波形换算,得到非正弦波电压的有效值。换算公式为

$$U_{PN} = U_{P\sim} = K_p U_{\sim} = \sqrt{2} U_a \quad (2-13)$$

$$U_N = \frac{U_{PN}}{K_{PN}} = \frac{\sqrt{2} U_a}{K_{PN}} \quad (2-14)$$

式中, U_{PN} 、 $U_{P\sim}$ 分别为非正弦波和正弦波的峰值; U_N 、 U_{\sim} 分别为非正弦波和正弦波电压的有效值; K_{PN} 为非正弦波的波峰因数,见表 2-1。

【例 2.2】 用峰值电压表测量正弦波、方波和三角波电压时,电压表读数均为 10V,试分别计算正弦波、方波和三角波的有效值各为多少?

解: 测量正弦波时, $U_{\sim} = U_a = 10V$

$$\text{测量方波时, } U_{\square} = \frac{\sqrt{2} U_a}{K_{P\square}} = \frac{\sqrt{2} \times 10}{1} = 14.14(V)$$



$$\text{测量三角波时, } U_{\Delta} = \frac{\sqrt{2}U_a}{K_{P\Delta}} = \frac{\sqrt{2} \times 10}{\sqrt{3}} = 8.16(\text{V})$$

用检波-放大式电压表测量非正弦电压时,如果直接将电压表的读数值作为它的有效值,则会产生波形误差。如测量方波时的波形误差为

$$\gamma_a = \frac{U_a - \sqrt{2}U_a/K_{P\Pi}}{U_a} \times 100\% = (1 - \sqrt{2}) \times 100\% = -41.4\%$$

由此可见,检波-放大式电压表的波形误差要比放大-检波式电压表的波形误差大得多,故在测量非正弦电压时一定要进行换算。

知识 2.3 热电偶变换式电子电压表

在电压测量中,经常需要测量一些非正弦波电压的有效值,如噪声电压、失真波形电压等。前面所讲的几种电压表虽然是以有效值刻度,但都是以正弦电压有效值刻度,无法直接进行非正弦波电压有效值的测量。因此,通常采用热电偶变换式电子电压表来实现不同波形有效值电压的测量。

热电偶变换式电子电压表是利用热电偶的热电转换原理实现交流电压有效值到直流电流之间的变换的。

热电偶变换式电子电压表的示意图如图 2-7 所示。图中 AB 为金属电阻丝,称为加热丝;DCE 为热电偶,它由两种不同材料的导体连接而成,导体 CD 与 CE 称为热电极,其交界面 C 与加热丝结合,称为“热端”或“工作端”,而 D、E 则称为“冷端”或“参考端”。当加入被测电压 U_x 时,AB 电阻丝因流过电流而温度升高,C 点温度也随之上升,热电偶两端由于存在温差而在 D、E 间产生热电动势。

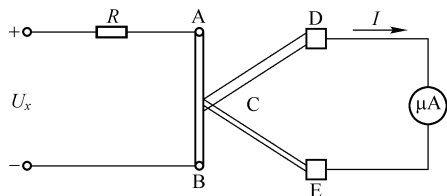


图 2-7 热电偶变换式电子电压表示意图

实验证明,热电动势的大小为

$$E_{DE} = K(T - T_0) = K \cdot \Delta T$$

式中, E_{DE} 为热电动势; T 为“热端”温度; T_0 为“冷端”温度; K 为热电偶变换系数,它与两导体的材料有关; ΔT 为热电偶两端的温度差。

上式表明,热电动势的大小正比于热电偶两端的温度差,且与组成热电偶的材料有关。

由于热电动势的作用,于是在电路中就产生一个直流电流 I ,使微安表偏转。该直流电流正比于热电动势,热电动势又正比于热电偶两端的温度差,而热端温度正比于被测电压有效值的平方,因此通过微安表的直流电流 I 正比于 U_x^2 ,这就完成了交流电压有效值到直流电流之间的转换。但这种转换是非线性的,实际应用中,还须采取措施使表头刻度线性化。

在实际应用的热电偶变换式电压表中,为了克服直流电流与被测交流电压有效值的非线性关系,常利用两个结构和性能完全相同的热电偶构成热电偶桥,称为双热电偶变换器,其电



路原理如图 2-8 所示, 图中两个热电偶 T_1 、 T_2 特性一样 (K 值一样)。 T_1 称为测量热电偶, 产生的热电动势 $E_x = KU_x^2$; T_2 称为平衡热电偶, 产生的热电动势 $E_f = KU_o$, 只要直流放大器的增益很大, 则直流放大器的输入端电压 $\Delta U = E_x - E_f \approx 0$, 即 $E_x = E_f$ 因而 $KU_x^2 = KU_o^2$, 则 $U_x = U_o$, 使仪表的标度为线性刻度。

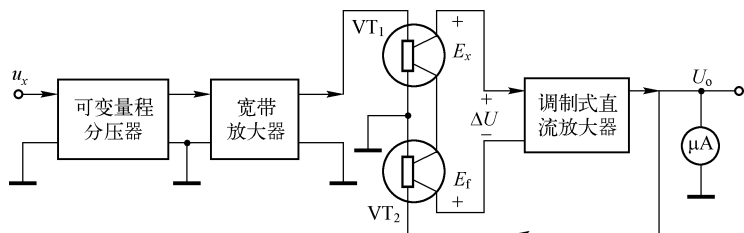


图 2-8 双热电偶变换式电压表原理框图

由于这种电压表是按有效值定义进行测量的, 所以又称为有效值电压表, 它按正弦波电压有效值刻度。当测量非正弦波电压时, 理论上不会产生波形误差, 但实际上由于放大器的带宽和非线性的影响, 也会存在一些误差。

这种电压表频率范围较宽, 可达到几十 MHz, 由于输入端阻抗变换器和衰减器的作用, 可使输入阻抗达到 $1M\Omega$ 以上, 如 DA-24 型交流电压表。

由于利用有效值电压表可直接从表头上读出被测非正弦电压的有效值, 而无须换算, 因此又常把这种电压表称为真有效值电压表。

知识 2.4 模拟电子电压表的选择和使用

在选择使用模拟电子电压表时, 应根据被测电压的种类、频率等确定电压表的类型; 在其他条件相同的情况下, 应尽量选择输入阻抗高的电压表; 还应考虑电压表的测量误差, 包括基本误差及各种附加误差, 以保证测量准确度达到要求。在测量使用过程中, 应重点注意以下几个方面。

(1) 准备工作

测量时应正确放置电压表, 并使用符合要求的电源电压。测量时, 为减少干扰和保证安全, 仪表接地端应可靠接地。

(2) 测试线的连接

在测量时, 接线不正确往往会破坏被测电路的工作状态, 甚至会造成仪器损坏。测试连接线应尽量短一些, 应使用屏蔽电缆连接, 测量高频信号时应使用高频同轴电缆连接。接线时应先接地线, 后接测试线 (信号线); 拆线时与之相反。否则, 外界的感应信号可能使仪表指针的偏转超过量程而损坏表头。

(3) 量程选择

测量时应按照被测电压的大小选择合适的量程。一般情况下, 应尽量使指针处在量程满刻度值的 $2/3$ 以上区域, 以减小测量误差。如果测量之前不知道被测电压的大小, 可以先从大量程开始, 再逐步减小量程, 直到量程合适为止。

(4) 零点调整

在测量之前, 应检查电压表指针是否指在零位, 否则应进行调零。通电前通过调节表头



的机械调零螺钉,使表头针准确指在零位,称为机械调零;接通电源后,先将输入端短路,调节“调零”旋钮,使表头指针指在零位,称为电气调零。在使用过程中,当变换量程后应重新进行电气调零。

(5) 非正弦波测量

测量非正弦波电压时,除了选择检波类型合适的电压表之外,还应注意正确理解电压表读数的含义,并对读数进行换算或修正,否则将产生波形误差。

任务3 仪器介绍——数字式直流电压表

知识3.1 数字式电压表的组成

数字式电压表(DVM),是利用模拟/数字(A/D)转换器将被测模拟电压变换成相应的数字量,然后通过电子计数器计数,最后把被测电压值以十进制数字的形式显示在显示器上。数字式电压表由模拟电路和数字电路两大部分组成,其组成框图如图2-9所示。

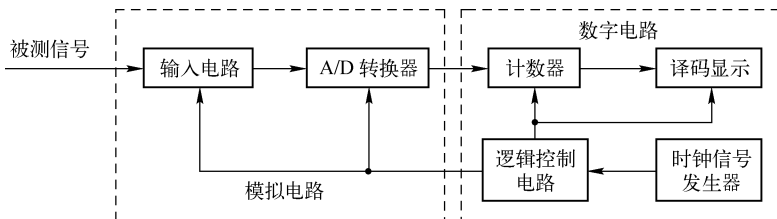


图2-9 数字式电压表的组成框图

模拟电路部分主要包括输入电路(阻抗变换器、电压放大器、衰减器等)和A/D转换器。A/D转换器是数字电压表的核心,其主要功能是将被测模拟电压变换为数字量,然后送入数字电路进行计数并显示。数字电压表的一些技术指标(如准确度、分辨率、测量速度等)主要取决于A/D转换器的工作性能。

数字电路部分主要包括计数器、译码器、显示器、逻辑控制电路和时钟信号发生器,它主要完成逻辑控制、计数、译码和显示等功能。

知识3.2 数字式电压表的工作原理

数字式电压表的核心是A/D转换器。根据A/D转换器的转换原理不同,可把数字式电压表分为比较式、斜坡式、双积分式和复合式数字式电压表。其中比较式和双积分式数字电压表最为常用,下面简述比较式和双积分式A/D转换器以及由它们组成的数字式电压表的基本工作原理。

1. 逐次逼近比较式数字式电压表

逐次逼近比较式数字式电压表的核心部件是逐次逼近比较式A/D转换器,它属于比较式A/D转换器,其基本原理是用被测电压和一个可变的比较电压按照“大者弃、小者留”



的原则逐次进行比较，直至逼近而得出被测电压值。

(1) 电路组成

逐次逼近比较式 A/D 转换器的电路组成框图如图 2-10 所示，它是由电压比较器、D/A 转换器、逐次逼近寄存器 SAR、逻辑控制电路、时钟脉冲发生器、基准电压源和显示译码电路组成。

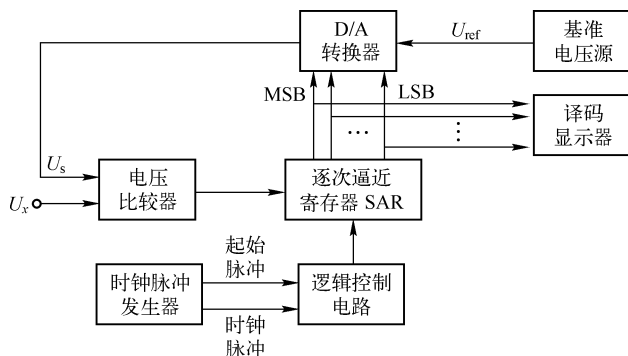


图 2-10 逐次逼近比较式 A/D 转换器原理框图

(2) 工作原理

逐次逼近比较式 A/D 转换器的工作原理类似于用天平称量物体质量，图 2-10 中的电压比较器相当于天平，被测模拟电压 U_x 相当于物体，基准电压 U_{ref} 相当于砝码。

逐次逼近寄存器 SAR 实际上是一个数码寄存器，在时钟脉冲作用下，SAR 提供代表不同比较电压的数字码，并通过 D/A 转换器输出可变的比较电压，加到电压比较器与 U_x 进行比较，使比较器有不同的高低电位输出，根据“大者弃、小者留”的原则，该电位用以确认 SAR 的各位数码是“留码”还是“去码”，通常以“1”表示“留码”，以“0”表示“去码”。

被测电压与可变比较电压的比较过程从最高位开始，当逐次逼近寄存器输出的编码从大到小变化时，D/A 转换器也随之输出从大到小的比较电压，根据比较结果逐次减小寄存器的数值，使输出的比较电压与被测电压逼近直至相等。最终 SAR 输出的二进制编码就对应于 U_x 的大小，然后送至译码显示器，显示出被测电压值。

逐次逼近比较式 A/D 转换器的测量误差与其转换位数有关，转换位数越多误差越小。目前常见的集成化逐次逼近比较式 A/D 转换器有 8 位、10 位及 12 位、14 位等几种类型，普通数字电压表一般使用 8 位或 10 位的 A/D 转换器，高精度数字电压表则使用 12 位或 14 位的 A/D 转换器。

(3) 性能特点

逐次逼近比较式数字电压表具有以下特点：

① 测量速度快 测量速度取决于时钟脉冲的频率和逐次逼近寄存器的位数，而时钟频率又取决于 D/A 转换器和比较器的速度。由于比较电压是按照 $2^{-n} U_{ref}$ 递减设置的，没有积分式 A/D 转换器中电压的积分过程，所以测量速度很快。

② 测量精度高 逐次逼近比较式 A/D 转换器的测量精度决定于基准电压源和电压比较器，并且还与 D/A 转换器的位数有关。只要提高基准电压源和电压比较器的稳定度与准确度，以及增加比较位数，就可以使测量精度达到很高。



③ 抗串模干扰能力差 因为比较器输入的是被测电压的瞬时值，而不是平均值，所以外界任何干扰电压的窜入都会影响测量结果。为此，需要在输入端增设滤波器来抑制串模干扰，提高抗干扰能力，但这样会降低测量速度。

2. 双积分式数字电压表

双积分式数字电压表的核心部件是双积分式 A/D 转换器，属于电压 - 时间 (V - T) 转换式 A/D 转换器。其基本原理是利用积分器将被测电压转换成与之成正比的时间间隔，然后用电子计数器在此间隔内对时钟脉冲进行累加计数，最后用数字显示测量结果。

(1) 电路组成

双积分式 A/D 转换器是由积分器、零比较器、逻辑控制电路、电子开关、时钟发生器、基准电压源和计数显示电路等组成，其原理框图如图 2-11 所示。

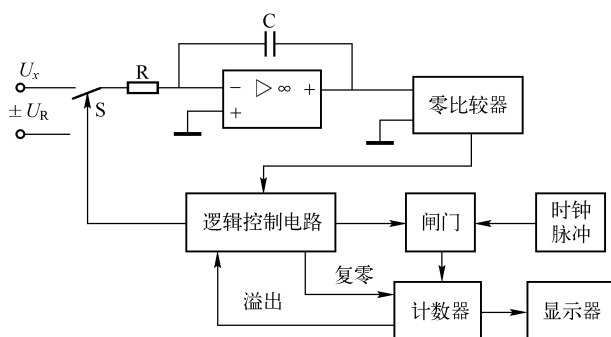


图 2-11 双积分式 A/D 转换器原理框图

(2) 工作原理

双积分式 A/D 转换器对 U_x 的一次测量需要先后进行两次积分才能完成，即首先对被测电压进行定时积分，然后对基准电压进行反向定值积分。通过两次积分的比较，将被测电压转换成与之成正比的时间间隔。双积分式 A/D 转换器的一个转换过程分为准备、采样和比较三个阶段，其工作波形如图 2-12 所示。

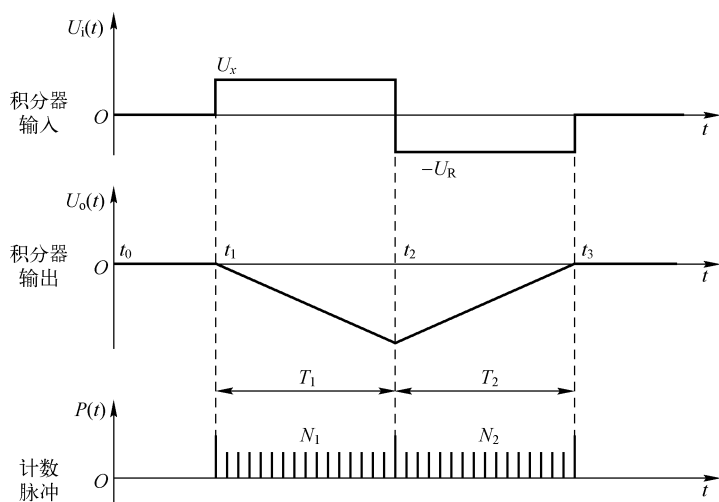


图 2-12 双积分式 A/D 转换器的工作波形



① 准备阶段 ($t_0 \sim t_1$)，逻辑控制电路使开关 S 接地，积分器输入电压为零，使输出电压也为零，并使计数器复零。

② 采样阶段 ($t_1 \sim t_2$)，即定时积分阶段。在 t_1 时刻，逻辑控制电路使开关 S 接通被测电压 U_x ，积分器开始对 U_x 积分，若 $U_x > 0$ ，则积分器输出电压线性递减（若 $U_x < 0$ ，则积分器输出电压线性递增）。同时，逻辑控制电路使闸门打开，计数器开始对时钟脉冲累加计数。当计数器计数达到最大计数值 N_1 时，即 t_2 时刻，计数器输出溢出信号，逻辑控制电路使开关 S 断开，并关闭闸门，计数器复零。在 t_2 时刻积分器的输出电压为

$$U_{o1} = -\frac{U_x}{RC}T_1 \quad (2-15)$$

式中， $T_1 = t_2 - t_1$ 为定时采样时间； R 、 C 分别为积分器的积分电阻和积分电容。

③ 比较阶段 ($t_2 \sim t_3$)，即反向定值积分阶段。在 t_2 时刻，逻辑控制电路使开关 S 断开 U_x 而接通与 U_x 极性相反的基准电压 U_R ，积分器开始对 U_R 进行反向积分，同时，逻辑控制电路使闸门打开，计数器对时钟脉冲进行计数。积分器输出电压从 U_{o1} 反向逐渐增大、趋向于零。当积分器输出电压等于零时，即 t_3 时刻，零比较器输出信号给逻辑控制电路，使开关 S 断开，并关闭闸门，计数器停止计数，同时将计数结果（即计数值 N_2 ）送至显示器显示。在 t_3 时刻，积分器的输出电压为零，此时有

$$U_{o2} = U_{o1} + \frac{U_R}{RC}T_2 = -\frac{U_x}{RC}T_1 + \frac{U_R}{RC}T_2 = 0 \quad (2-16)$$

式中， $T_2 = t_3 - t_2$ 为比较时间。

$$\text{由此可得} \quad U_x = \frac{U_R}{T_1}T_2 \quad (2-17)$$

由式 (2-17) 可知， U_R 、 T_1 均为定值，所以被测电压 U_x 与比较时间 T_2 成正比。

由于计数器是对同一时钟脉冲 T_0 进行计数的，则计数时间与计数值的关系分别为

$$T_1 = N_1 T_0, \quad T_2 = N_2 T_0$$

$$\text{由此可得} \quad U_x = \frac{U_R}{N_1}N_2 \quad (2-18)$$

由于式中基准电压 U_R 为定值； N_1 为 T_1 时间计数器的最大计数值，也为定值。所以被测电压 U_x 与计数值 N_2 成正比。通常把 U_R/N_1 称为双积分式 A/D 转换器的转换灵敏度，即双积分式数字电压表的分辨率。

(3) 性能特点

双积分式数字电压表具有以下特点：

① 测量准确度高 双积分式 A/D 转换器的准确度主要取决于基准电压的准确度和稳定度，而与 R 、 C 、 T_0 无关，因而准确度高。

② 抗干扰能力强 因为测量结果反映的是被测电压在采样时间内的平均值，所以只要采样时间 T_1 为干扰信号（特指工频干扰）周期的整数倍，则干扰信号产生的平均值为零，这样通过积分就消除了对 U_x 中的干扰，故这种 A/D 转换器的抗干扰能力强。

③ 测量速度慢 为了提高数字电压表的分辨力（即灵敏度），要使采样时间 T_1 长些，以增大计数值，这就更降低了这种 A/D 转换器的转换速度。一般双积分式 A/D 转换器的转换速度（即测量速度）仅为几次/秒，通常用于直流电压测量。



知识 3.3 数字式电压表的性能指标

数字式电压表的性能指标主要有以下一些。

1. 电压量程

电压量程是指测量电压范围的上限值与下限值之差，包括基本量程和扩展量程。未经衰减器和放大器的量程称为基本量程，通常为 200mV、1V 或 2V，也有的为 5V，基本量程的误差最小，扩展量程是借助于输入衰减器和放大器的适当配合来完成量程扩展。

2. 显示位数

显示位数是指能显示 0 ~ 9 共 10 个完整数码的显示器位数。能显示 0 ~ 9 10 个完整数码的显示位数称为完整位，否则称为不完整位，不完整位通常是最高位。

例如，某数字电压表最大显示数值为 9999，所以它是一个四位的 DVM；又如，另一数字电压表最大显示数值为 19999，它的首位只能显示，“1”或“0”是不完整位，称之为 1/2 位或半位，所以它是一个 4 位半的 DVM。

3. 分辨率

分辨率是指数字式电压表能够反映出的被测电压的最小变化值，即显示器末位变化一个数字所对应的最小输入电压值，也就等于所选量程上末尾的“1”表示的电压值。在不同的量程上分辨率是不同的，最小量程的分辨率最高。

例如，4 位半 DVM，在量程 20V 上，满度值为 19.999V，末尾的“1”表示 1mV，则其分辨率为 1mV。在最小量程 200mV 上，满度值为 199.99mV，则其分辨率为 0.01mV。

4. 测量速度

测量速度是指每秒对被测电压的测量次数或完成一次测量所需的时间。数字式电压表的测量速度主要取决于 A/D 转换器的转换速度，由比较式 A/D 转换器构成的 DVM 测量速度较快，一次测量所需时间仅几 μs ，测量速度可达百万次/s，由双积分式 A/D 转换器构成的 DVM 测量速度较慢，一次测量所需时间几百 ms，测量速度仅为几次/s。

5. 测量误差

数字式电压表的测量误差通常用它的固有测量误差来衡量，固有测量误差主要是读数误差和满度误差，常用测量的绝对误差表示，即

$$\Delta U = \pm (\alpha\% \cdot U_x + \beta\% \cdot U_m)$$

或

$$\Delta U = \pm \alpha\% \cdot U_x \pm \text{几个字}$$

式中 α 为误差的相对项系数、 U_x 为被测电压读数、 $\alpha\% \cdot U_x$ 为读数误差；

β 为误差的固定项系数、 U_m 为量程的满度值、 $\beta\% \cdot U_m$ 为满度误差，即 \pm 几个字。

6. 输入阻抗

测量直流电压时，输入阻抗用输入电阻 R_i 表示，量程不一样， R_i 也有差别，一般在 1 ~



100M Ω 之间。测量交流电压时,输入阻抗用输入电阻 R_i 并联输入电容 C_i 表示, C_i 一般为几十 pF。

7. 抗干扰能力

数字式电压表的抗干扰能力通常用串模干扰抑制比 (SMR) 和共模干扰抑制比 (CMR) 来表征。抗干扰能力是保证仪表具有高精度测量性能的一个重要因素。干扰抑制比的数值越大,表明数字式电压表抑制干扰的能力越强。数字式电压表的串模干扰抑制比 (SMR) 一般为 50 ~ 90dB,共模干扰抑制比 (CMR) 一般为 80 ~ 150dB。

任务 4 仪器介绍——数字式万用表

数字式万用表 (DMM), 又称数字多用表, 是一种多用途、多量程的测量仪表, 它实际上是在直流数字电压表的基础上增加了一些转换电路而构成的。数字万用表不但可以测量交直流电压、交直流电流和电阻, 而且还可以测量二极管、三极管、电容量、信号的频率、判断电路的通、断等, 因此它比数字电压表的应用更普遍、更广泛。

知识 4.1 数字式万用表的结构组成

数字式万用表的原理框图如图 2-13 所示。由图可知, 整个电路主要由数字式直流电压表 (DVM) 和交流电压/直流电压 (AC/DC) 转换器、电流/直流电压 (I/DC) 转换器、电阻/直流电压 (R/DC) 转换器及量程选择电路等组成。

数字式万用表的基本测量原理是先把被测量通过不同的转换器转换成直流电压, 然后再用数字式直流电压表进行电压测量, 从而得到被测量的数值。因此可以说 DMM 的核心是 DVM, 其各部分测量电路的工作原理如下。

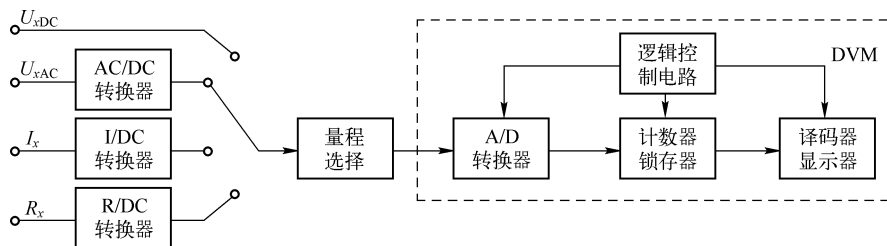


图 2-13 数字式万用表的组成原理框图

(1) 测量直流电压

被测电压 U_x 直接经量程转换电路分压后, 送至 A/D 转换器转换为数字量输出并显示。

(2) 测量交流电压

被测电压 U_x 经 AC/DC 转换器 (即检波器) 转换成直流电压, 再经过量程转换电路分压后, 送至 A/D 转换器转换为数字量输出并显示。检波器通常采用二极管整流的方法来实现交流电压到直流电压的转换。



(3) 测量直流电流

被测电流 I_x 经 I/DC 转换器转换得到直流电压后, 送至 DVM 中进行测量并显示。I/DC 转换器的实质是将被测电流 I_x 通过取样电阻, 在其两端产生电压降, 这个电压正比于被测电流 I_x , 从而完成直流电流到直流电压的线性转换。

(4) 测量交流电流

被测电流 I_x 经过电流电压转换器转换得到交流电压, 再经过检波器转换成直流电压后, 送至 DVM 中进行测量并显示。

(5) 测量电阻

被测电阻 R_x 经过 R/DC 转换器转换得到直流电压后, 送至 DVM 中进行测量, 最终显示出被测电阻值。R/DC 转换器的实质是利用一个恒流源的电流通过被测电阻 R_x , 产生一个与 R_x 成正比的电压, 来完成电阻的测量。设恒流源的电流为 I_s , 测得 R_x 两端电压为 U_x , 则 $R_x = U_x / I_s$ 。为了适应测量不同阻值范围的电阻, 可以改变恒流源电流 I_s 的大小, 来改变电阻测量的量程。

知识 4.2 数字式万用表的性能指标

数字式万用表的型号很多, 这里以 DT890B 型数字式万用表为例, 说明其主要性能指标, DT890B 型数字式万用表是一种性能稳定可靠的双积分式 3 位半数字万用表, 采用 18mm 字高的大液晶显示器, 读数清晰、使用方便。可以用来测量直流电压、直流电流、交流电压、交流电流、电阻、电容、二极管的正向导通电压 U_F 和三极管的直流放大倍数 h_{FE} 等。其主要性能指标如下。

- (1) 量程和测量精度: 如表 2-3 所示。
- (2) 最大显示数字: ± 1999 小数点自动转换。
- (3) 最大输入电压: 直流或交流峰值 1000V (200mV 挡最大有效值为 220V)。
- (4) 过载保护特性: 200mA/250V 熔丝 (10A 挡无熔丝)。
- (5) 输入阻抗: 直流电压挡 $\geq 10M\Omega$, 交流电压挡 $\geq 1M\Omega$ 。
- (6) 交流测量特性: 频率范围为 40 ~ 400Hz, 显示正弦波有效值 (平均值响应)。

表 2-3 DT890B 型数字式万用表性能指标

测试功能	量程范围	测量精度
直流电压 (V)	0.2, 2, 20, 200, 1000	$\pm (0.5\% + 2)$
交流电压 (V)	0.2, 2, 20, 200, 700	$\pm (0.8\% + 3)$
直流电流 (A)	2m, 20m, 200m, 10	$\pm (0.8\% + 3)$
交流电流 (A)	2m, 20m, 200m, 10	$\pm (1.0\% + 3)$
电阻 (Ω)	200, 2k, 20k, 200k, 2M, 20M, 200M	$\pm (0.8\% + 3)$
电容 (F)	2n, 20n, 200n, 2 μ , 20 μ	$\pm (2.5\% + 5)$
三极管 h_{FE}	0 ~ 1000 $I_b = 10\mu A$ $U_{ce} < 3.0V$ NPN, PNP	
二极管 U_F	0 ~ 2.8V $I_F = 1.5mA$ $U_F < 3.0V$	



知识 4.3 数字式万用表的使用方法

(1) 面板布置

BT890B 型数字式万用表的面板如图 2-14 所示。

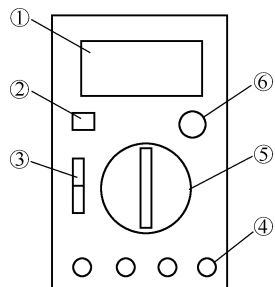


图 2-14 BT890B 型数字式万用表面板图

① 液晶显示屏 用于显示测量数值。显示器采用 20mm 大号 LCD 显示屏, 读数清晰, 具有自动调零和自动显示极性的功能。当积层电池的电压低于 7V 时, 显示屏左下方显示低电压指示符号, 提示需要更换电池。超量程时显示“1”或“-1”, 视被测量电量的极性而定。小数点位置由量程开关进行同步控制。

② 电源开关 用于接通或切断表内电池电源。按下, 置于“ON”, 电源接通, 显示屏上会有相应的数字显示, 此时即可进行测量; 使用完毕后应将开关弹起, 置于“OFF”, 切断电源, 以免空耗电池。

③ 电容测量插座 用于测量不同引脚间距的电容。

④ 表笔输入插孔 用于外接测量表笔。插孔共有四个, 分别标有“20A”、“mA”、“COM”和“V·Ω”。测量时, 黑表笔要插入“COM”插孔, 红表笔则要根据被测量及其量值大小插入相应的插孔。

⑤ 量程转换开关 用于完成测试功能和量程的选择。根据被测量类型及其量值的大小来选择量程。

⑥ 三极管测试插座 用于测试半导体三极管的 h_{FE} 值。该插座共有两组, 分别测量 NPN 和 PNP 型三极管, 测量三极管 h_{FE} 值时, 应根据三极管类型, 将其三个引脚分别插入对应的 B、C、E 插孔中。

(2) 基本使用方法

① 测量电压 将红表笔插入“V·Ω”孔中, 黑表笔插入“COM”孔中, 根据被测直流或交流电压的大小合理选择量程, 把表笔与被测电路并联, 即可得到被测电压值。测量直流电压时, 应注意电压的极性。

② 测量电流 把红表笔插入“mA”或“20A”插孔, 根据被测直流或交流电流的大小合理选择量程, 把万用表串联接入被测电路, 即可得到被测电流值。测量直流电流时, 应注意电流的方向。切记不可用电流挡测量电压。

③ 测量电阻 把红表笔插入“V·Ω”孔中, 黑表笔插入“COM”孔中, 合理选择量程, 把表笔与被测电阻连接, 即可得到被测电阻值。

在 200Ω 挡, 表笔短路时, 由于接触电阻影响, 显示器有几个数字是正常的, 这时应从测量读数中减去几个数字。

④ 测量二极管 将红表笔插入“V·Ω”孔中, 黑表笔插入“COM”孔中, 将量程选择开关置于二极管挡。测量正向时, 将红表笔接二极管正极, 黑表笔接二极管负极, 若二极管正常, 则万用表显示出二极管的正向导通电压, 测锗管时应显示 0.200 ~ 0.300V, 测硅管时应显示 0.500 ~ 0.700V, 这样即可通过显示的电压值来判断二极管的类型和好坏。

测量反向时, 表笔与二极管的接法与上述相反, 若二极管正常, 则显示“1”表示溢



出；若二极管击穿损坏，将显示“000”，说明二极管短路。

⑤ 测量三极管 利用数字式万用表可判定三极管的各引脚电极、测量三极管正向压降和 h_{FE} 等参数，应使用二极管挡和 h_{FE} 专用插座进行测试。

- 判定基极 将量程选择开关拨至二极管挡，红表笔固定接某个电极，用黑表笔依次接触另外两个电极。若两次显示值基本相同（都在 1V 以下或者都显示“1”），则说明红表笔所接的就是基极；若两次显示值中，一次在 1V 以下，另一次显示“1”，则说明红表笔接的不是基极，应改变接法重新测量，直到找出基极。
- 判定三极管类型 确定基极后，用红表笔接在基极上，用黑表笔依次接触另外两个电极。若显示都在 1V 以下，则该管为 NPN 型；若两次都显示“1”，而表笔反过来接都在 1V 以下，则该管为 PNP 型。
- 测量三极管的 h_{FE} 值 根据被测三极管的管型，选择“NPN”或者“PNP”插座，将三个引脚分别插入对应的 B、C、E 插孔中，即可测量出 h_{FE} 值。根据三极管正确连接时处于放大状态其 h_{FE} 值较大，可以判别出三极管集电极和发射极。

⑥ 判断电路的通断 将红表笔插入“V· Ω ”孔中，黑表笔插入“COM”孔中，量程选择开关拨至蜂鸣器挡。将红、黑表笔分别接触被测电路，若被测线路电阻低于 20Ω 时，蜂鸣器发出响声，表示电路是连通的。通过蜂鸣器来检查线路通断，既迅速又方便。

⑦ 测量电容 DT890B 型 DMM 可以测量一般电容器的容量大小。测量时，只需将被测电容插入电容测量插座中，并合理选择量程即可得到被测电容值。因仪器本身已对电容挡设置了保护，故电容测试过程中不用考虑电容极性及电容充、放电等情况的影响。

任务5 应用实训——电压测量实训

实训 5.1 稳压电源参数测试实训

1. 实训目的

- (1) 学会使用数字式万用表测量电压和电流；
- (2) 掌握直流稳压电源主要参数的测量方法。

2. 实训设备

数字式万用表，交直流电流表、交流毫伏表、交流调压器、直流稳压电源、滑线电阻器。

3. 实训内容

测试直流稳压电源的主要参数，测试电路连接如图 2-15 所示。

(1) 输出电压及调节范围测试

直流稳压电源的输出电压及调节范围是直流稳压电源最基本的性能指标，测试时先调节调压器使输入交流电压为 220V，再调节负载电阻 R_L 使输出电流为规定值，用数字式万用表



直流电压挡测量稳压电源的输出电压 U_o ，应符合规定值，对于输出可调的稳压电源，其输出电压调节范围应覆盖规定的输出电压范围。

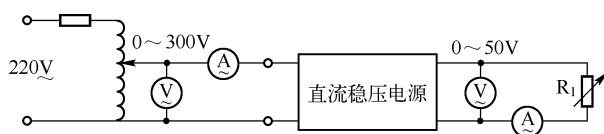


图 2-15 直流稳压电源测试电路

(2) 电压调整率测试

电压调整率 (S_V) 是用于衡量稳压电源在负载电流和环境温度不变，输入电压变化时，维持输出电压不变的能力。通常用输出电压的相对变化量 $\Delta U_o/U_o$ 与输入电压的变化量 ΔU_i 之比来表示。测量时保持输出电流为规定值，调节调压器使输入电压在规定范围内变化，测量输出电压的变化，将测量数据填入表 2-4 中，并计算电压调整率。

表 2-4 电压调整率测试计算数据

测量参数	输出电压 (V)	输出电流 (A)	输入电压变化 (V)	输出电压变化 (V)	电压调整率
测量计算值					

(3) 电流调整率测试

电流调整率 (S_I) 是用于衡量稳压电源在输入电压和环境温度不变，输出电流变化时，维持输出电压不变的能力。通常用输出电压的相对变化量 $\Delta U_o/U_o$ 与输出电流的变化量 ΔI_o 之比来表示。测量时保持输入电压不变，调节负载电阻，使输出电流在一定范围内变化，测量输出电压的变化，将测量数据填入表 2-5 中，并计算电流调整率。

表 2-5 电流调整率测试计算数据

测量参数	输入电压 (V)	输出电压 (V)	输出电流变化 (A)	输出电压变化 (V)	电流调整率
测量计算值					

(4) 纹波电压测试

纹波电压是指稳压电源的输入电压和输出电流为规定值时，在输出的直流电压 U_o 中叠加的交流波动电压，测量输出纹波电压，可用交流毫伏表对输出电压进行测量。

由于纹波电压不是正弦波，均值电压表或峰值电压表的读数不能代表纹波电压的有效值，要读出有效值，应使用有效值电压表。

实训 5.2 不同波形电压换算实训

1. 实训目的

- (1) 理解交流电压表指示值的含义；
- (2) 掌握交流电压各值间的换算方法。



2. 实训设备

峰值电压表、均值电压表、有效值电压表。

3. 实训内容

(1) 已知各波形电压的峰值均为 1V ，计算不同类型电压表测量时的指示值，将计算数据填入表 2-6 中。

表 2-6 峰值为 1V 时各电压表的指示值

测量用电压表	正 弦 波	方 波	三 角 波	半波整流波	全波整流波
峰值电压表					
均值电压表					
有效值电压表					

(2) 已知各波形电压的平均值均为 1V ，计算不同类型电压表测量时的指示值，将计算数据填入表 2-7 中。

表 2-7 平均值为 1V 时各电压表的指示值

测量用电压表	正 弦 波	方 波	三 角 波	半波整流波	全波整流波
峰值电压表					
均值电压表					
有效值电压表					

(3) 已知各波形电压的有效值均为 1V ，计算不同类型电压表测量时的指示值，将计算数据填入表 2-8 中。

表 2-8 有效值为 1V 时各电压表的指示值

测量用电压表	正 弦 波	方 波	三 角 波	半波整流波	全波整流波
峰值电压表					
均值电压表					
有效值电压表					

(4) 用正弦有效值刻度的均值电压表测得各波形信号的电压值均为 1V ，计算各波形电压的峰值、平均值、有效值，将计算数据填入表 2-9 中。

表 2-9 均值电压表指示为 1V 时的电压值

测量用电压表	正 弦 波	方 波	三 角 波	半波整流波	全波整流波
峰值电压表					
均值电压表					
有效值电压表					

(5) 用正弦有效值刻度的峰值电压表测得各波形信号的电压值均为 1V ，计算各波形电压的峰值、平均值、有效值，将计算数据填入表 2-10 中。



表 2-10 峰值电压表指示为 1V 时的电压值

测量用电压表	正 弦 波	方 波	三 角 波	半波整流波	全波整流波
峰值电压表					
均值电压表					
有效值电压表					

(6) 用正弦有效值刻度的真有效值电压表测得各波形信号的电压值均为 1V，计算各波形电压的峰值、平均值、有效值，将计算数据填入表 2-11 中。

表 2-11 有效值电压表指示为 1V 时的电压值

测量用电压表	正 弦 波	方 波	三 角 波	半波整流波	全波整流波
峰值电压表					
均值电压表					
有效值电压表					

实训 5.3 数字式万用表应用实训

1. 实训目的

- (1) 学会数字式万用表的使用方法；
- (2) 掌握电阻和电容的测量方法；
- (3) 掌握二极管、三极管的测量和判别方法。

2. 实训设备

DT930 数字式万用表、电阻、电容、二极管、PNP 三极管、NPN 三极管。

3. 实训内容

(1) 测量电阻

用数字式万用表的电阻挡测量若干个不同阻值的电阻，正确选择量程，将测量电阻的相关数据填入表 2-12 中，并计算相对误差。

表 2-12 数字式万用表测量电阻的数据

元件序号	标称电阻值	使用量程	测得电阻值	标称值与测得值之差	相对误差
1					
2					
3					

(2) 测量电容

用数字式万用表的电容挡测量若干个不同容量的电容，正确选择量程，将测量电容的相关数据填入表 2-13 中，并计算相对误差。



表 2-13 数字式万用表测量电容的数据

元件序号	标称电容量	使用量程	测得电容量	标称值与测得值之差	相对误差
1					
2					
3					

(3) 测量二极管

用数字式万用表的二极管挡测量二极管的正向压降和反向特性，并判别其材料类型、引脚极性和质量优劣。测量 5 个不同型号的二极管，将测量二极管的相关数据及判别结果填入表 2-14 中。

表 2-14 数字式万用表测量二极管的数据

元件序号	正向压降	反向特性	材料类型	引脚极性	质量优劣
1					
2					
3					

(4) 测量三极管

用数字式万用表的二极管挡并测量三极管的正向压降；并判别其材料类型和引脚极性，在三极管专用测试插座上测量三极管的 h_{FE} 值，并判别其质量优劣。测量 5 个不同型号的三极管，将测量三极管的相关数据及判别结果填入表 2-15 中。

表 2-15 数字式万用表测量三极管的数据

元件序号	be 结正向压降	bc 结正向压降	材料类型	引脚极性	h_{FE} 值	质量优劣
1						
2						
3						

本项目小结

1. 交流电压的幅值可以用峰值、峰-峰值、平均值、有效值等参数来表征。为表征同一交流电压的有效值、平均值和峰值之间的关系，引入了波形因数和波峰因数。波形因数 K_F 定义为交流电压的有效值与平均值之比；波峰因数 K_p 定义为交流电压的峰值与有效值之比；他们可用来进行有效值、平均值和峰值之间的换算。

2. 用来表示功率、电压的增加或者衰减的倍数称为电平，电平的单位常用分贝（dB）。电平的测量实际上也是电压的测量，只不过表盘是以分贝（dB）刻度。当使用电压表的非基本量程测量时，表盘上指示的分贝值应再加上换挡的附加分贝值，才是实际的电平值。

3. 电压测量是电子测量中最常用、最基本、最重要的内容，电压测量通常使用电压表，因此电压表是电子测量仪器中使用量最多、应用最广泛的测量仪器之一。按照测量结果的显示方式不同，电压表可分为模拟式电压表和数字式电压表两大类。



4. 模拟式电压表按照结构类型不同,分为放大-检波式、检波-放大式、外差式和热电变换式电压表等多种,使用时应根据被测电压的种类合理选择电压表的类型;当采用不同检波器的电压表测量非正弦波信号或噪声信号电压时,应注意正确理解电压表读数的含义,并对读数进行换算,否则会产生很大的测量误差。

5. 数字式电压表根据 A/D 转换器的转换原理不同,分为斜坡式、比较式、双积分式和复合式数字电压表。其中比较式和双积分式数字电压表最为常用。逐次逼近比较式数字电压表具有测量精度高、测量速度快,但抗干扰能力差等特点;双积分式数字电压表具有抗干扰能力强、测量精密度高、价格便宜,但测量速度慢等特点。

6. 数字式万用表是在直流数字式电压表的基础上配以适当的转换电路而构成,其核心是数字式电压表。数字式万用表可以用来测量直流电压、直流电流、交流电压、交流电流、电阻、电容、二极管的正向导通电压 U_F 和三极管的 h_{FE} 等。使用时应注意正确插入表笔,选择合适的挡位和量程,切记不可用电流挡测量电压。

项目 2 思考题

1. 电压测量的特点是什么?对电压测量的要求有哪些?
2. 电子电压表如何分类?常用电子电压表有哪些类型?
3. 交流电压的幅值参数有哪些?各自的含义是什么?
4. 一般电压表是按什么值刻度?交流电压各幅值之间如何换算?
5. 什么叫做电平?电平的表示方法有哪些?
6. 放大-检波式电子电压表由哪几部分电路组成?其特点是什么?
7. 检波-放大式电子电压表由哪几部分电路组成?其特点是什么?
8. 热电偶变换式电子电压表由哪几部分电路组成?其特点是什么?
9. 逐次比较型 A/D 转换器由哪几部分电路组成?其特点是什么?
10. 双积分型 A/D 转换器由哪几部分电路组成?其特点是什么?
11. 数字式电压表具有哪些特点?其性能指标主要有哪些?
12. 数字式万用表的基本测量原理是什么?其基本测量功能有哪些?
13. 如何正确选择模拟电子电压表的量程?如何调整电压表的零点?



项目3 信号发生器及应用



本项目任务目标

1. 学习信号发生器的基本知识：应了解信号发生器的分类、基本结构组成、主要技术指标及信号发生器的发展趋势。
2. 学习低频信号发生器的相关知识：应了解低频信号发生器的结构组成和工作原理、学会低频信号发生器的使用。
3. 学习高频信号发生器的相关知识：应了解高频信号发生器的结构组成和工作原理、学会高频信号发生器的使用。
4. 学习函数信号发生器的相关知识：应了解函数信号发生器的结构组成和工作原理、学会函数信号发生器的使用。
5. 进行信号发生器应用实训：通过训练了解不同波形信号电压值的区别，掌握测试低频放大器和调谐放大器的基本技能。

任务1 知识引领——信号发生器基本知识

信号发生器又称信号源，是在电子测量中提供符合一定技术要求的各种电信号的仪器。信号发生器可产生不同波形、不同频率和不同幅度的信号，为测试各种模拟系统和数字系统提供所需的信号源。

知识 1.1 信号发生器的分类

信号发生器的类型很多，通常可从以下几方面分类。

1. 按输出波形分类

信号发生器按输出波形可分为以下类型，适合于不同的应用场合。

- (1) 正弦信号发生器。产生正弦波或受调制的正弦波，用于模拟系统测试。
- (2) 函数信号发生器。产生幅度与时间成一定函数关系的信号，如正弦波、三角波、方波等各种波形的信号，用于各种测试或实验。
- (3) 脉冲信号发生器。产生脉宽可调的重复脉冲波，用于脉冲电路测试。



- (4) 噪声信号发生器。产生各种模拟干扰噪声信号，用于噪声测试。
- (5) 数字序列发生器。产生各种不同的数字序列信号，用于数字系统测试。
- (6) 特殊信号发生器。产生特殊或专用电信号，如电视信号发生器、扫频信号发生器、任意波形发生器等，用于一些特殊应用场合。

2. 按输出频率范围分类

信号发生器按输出频率范围可分为以下类型，适合于不同的应用领域。

- (1) 超低频信号发生器。频率范围为 $0.001\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$ ，用于地震、电声、医疗设备的测试。
- (2) 低频信号发生器。频率范围为 $1\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ ，用于音频、家电、通信设备的测试与维修。
- (3) 视频信号发生器。频率范围为 $20\text{Hz} \sim 10\text{MHz}$ ，用于电视设备的测试与维修。
- (4) 高频信号发生器。频率范围为 $100\text{kHz} \sim 30\text{MHz}$ ，用于调幅广播、电报、通信设备的测试。
- (5) 甚高频信号发生器。频率范围为 $30 \sim 300\text{MHz}$ ，用于调频广播、电视、通信、导航设备的测试。
- (6) 超高频信号发生器，频率范围为 300MHz 以上，用于雷达、微波、卫星通信设备的测试。

3. 按信号产生方式分类

按信号产生的方式不同可分为以下几类，适合于不同的应用场合。

- (1) 调谐信号发生器。主振信号由调谐振荡器产生，用于一般信号发生器。
- (2) 锁相信号发生器。主振信号由锁相环电路产生，用于标准信号发生器。
- (3) 合成信号发生器。主振信号由频率合成器产生，用于高档次的信号发生器。

知识 1.2 信号发生器的基本组成

不同类型的信号发生器其性能、用途虽然各不相同，但基本构成是相似的，一般信号发生器的基本组成框图如图 3-1 所示，它包括主振器、变换器、放大器、指示器、输出电路及电源等几部分。

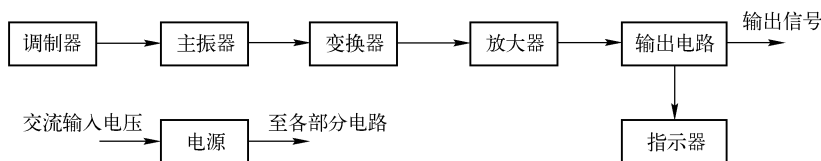


图 3-1 信号发生器的基本组成框图

1. 主振器

主振器是信号发生器的核心部分，由它产生各种不同频率的信号。主振器通常是正弦波



振荡器或多谐振荡器。它决定了信号发生器的工作频率范围、频率稳定度、频率准确度等一些重要性能。

2. 变换器

变换器包括信号调制器、脉冲形成器、波形变换器等，它将主振器的输出信号进行调制或变换，输出所要求的波形。

3. 放大器

放大器包括缓冲放大器、电压放大器、功率放大器等，它将振荡器的输出信号进行隔离和放大，以提高信号电压，或使信号发生器具有一定的输出功率。

4. 输出电路

输出电路包括输出衰减器、阻抗变换器、射极跟随器等。它用于输出电压调整和输出阻抗变换，为被测设备提供所需要的信号电压或功率。

5. 指示器

指示器用来监视输出信号。不同功用的信号发生器，指示器的种类也不同，它可以是电压表、频率计、功率计、调制度仪或以上几种。

指示器通常接在衰减器之前，使用时，测试者可以通过指示器提供的信息，来调整输出信号的幅值、频率等参数。指示器本身的准确度一般不是很高，其示值仅供参考。准确度要求高时，还需要用其他更准确的测量仪器进行测量。

6. 电源

电源为信号发生器的各部分电路提供所需的各种直流工作电压，通常是由 50Hz 的交流电（市电）经过变压、整流、滤波和稳压后得到。

知识 1.3 信号发生器的技术指标

信号发生器的性能通常可用频率特性、输出特性和调制特性（俗称三大指标）来评价。其性能指标很多，其中最常用的共有的性能指标有以下一些。

1. 频率特性

(1) 有效频率范围

信号发生器的有效频率范围是指各项指标均能得到保证时的输出频率范围。

(2) 频率准确度

频率准确度是指输出信号频率的实际值 f 与其标称值 f_0 的相对误差，其表达式为

$$\alpha = \frac{f - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (3-1)$$



(3) 频率稳定度

频率短期稳定度定义为信号发生器经规定的预热时间后, 频率在规定的時間间隔内的最大相对变化量, 其表达式为

$$\delta = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0} \quad (3-2)$$

(4) 频谱纯度

频谱纯度是正弦信号发生器的重要指标之一。它是指正弦信号发生器输出的频谱逼近理想频谱的程度, 常用谐波电平或谐波失真度等参数来衡量。

2. 输出特性

(1) 输出电压范围

输出电压范围是指输出信号幅度的有效范围, 也就是输出信号幅度的可调范围, 通常采用有效值来度量。

(2) 输出电压准确度

输出电压准确度是指输出信号的实际值与其标称值的相对误差。

(3) 输出电压平坦度

输出电压平坦度也就是输出电压的频率响应, 它是指在有效频率范围内调节频率时, 输出电压的相对变化量。

(4) 输出阻抗

输出阻抗的大小, 随信号发生器类型而异。低频信号发生器一般有 50Ω 、 600Ω 、 $5k\Omega$ 等几种不同的输出阻抗, 而高频信号发生器一般为 50Ω (或 75Ω) 不平衡输出阻抗, 在使用高频信号发生器时, 要注意阻抗的匹配。

(5) 输出波形

输出波形是指信号发生器所能输出的信号波形。低频信号发生器一般输出正弦波和方波; 函数信号发生器能输出正弦波、方波、三角波、锯齿波、脉冲波和阶梯波等; 高频信号发生器则能输出正弦波和各种调制波。

3. 调制特性

(1) 调制类型

许多信号发生器都具有调制功能, 如高频信号发生器, 一般都具有输出一种或多种调制信号的功能, 通常为调幅和调频, 有些还具有调相、脉冲调制、数字调制、矢量调制等功能。

(2) 调制频率

调制频率是指调制信号的频率, 它可以是固定的或连续可调的, 调幅信号的调制频率通常为 400Hz 和 1000Hz ; 而调频信号的调制频率可在 $10\text{Hz} \sim 100\text{kHz}$ 范围内改变。

(3) 调制深度

调制深度是指调幅信号的调幅系数或调频信号的最大频偏以及调制的线性度等参数。

(4) 调制信号源

当调制信号由信号发生器内部产生时, 称为内调制; 当调制信号由外部加到信号发生器



上进行调制时,称为外调制。

具有输出调制波功能的信号发生器,是测试无线电收、发设备不可缺少的仪器。

随着电子技术水平的不断发展,特别是微处理器、数字信号处理技术的广泛应用,信号发生器正在向着数字化、自动化、智能化方向发展,利用数字技术可以合成更多种类、更加复杂的输出信号,如通信系统中的各种数字调制信号、任意波形信号等。同时仪器还具备了自校正、自检验、自动故障诊断等功能,并带有系统总线接口,可以和主控计算机或其他测量仪器连接,构成自动测试系统。

知识 1.4 信号发生器的选择

由于信号发生器的种类、型号繁多,使用时可根据具体情况从以下几个方面进行选择:

(1) 根据测试功能选择

不同的信号发生器,其主要的功能和用途是不同的。低频信号发生器主要用于检修、测试或调整各种低频放大器、扬声器、滤波器等频率特性;高频信号发生器主要用于测试各种接收机的灵敏度、选择性等参数,同时也为调试高频电子线路提供射频信号;函数信号发生器可提供多种信号波形,可用于波形响应研究及各种实验研究;脉冲信号发生器可用于测试电路或器件的振幅特性、过渡特性和开关速度等。

(2) 根据输出信号波形选择

信号发生器的输出波形种类有多种多样,输出电平也不相同,不同的测量场合对此需求也是不同的。如低频、高频、超高频信号发生器用于模拟电路的测量;函数信号发生器和脉冲发生器则既可用于模拟电路,又可用于数字电路的测量;数字序列发生器则用于数字设备的测量。

(3) 根据信号频率选择

可根据所需信号的频率,在对应频段选择信号发生器,如选择超低频信号发生器、低频信号发生器、视频信号发生器、高频信号发生器、超高频信号发生器等。

(4) 根据测量准确度要求选择

测量与测试目的不同,对测量准确度的要求也是不同的。在一般实验中对输出信号的频率、幅度的准确度和稳定度以及波形失真等要求不严格时,可采用普通信号发生器;在对仪器进行校准或对测量准确度有严格要求的场合中,应选用准确度和稳定度较高的标准信号发生器。

任务2 仪器介绍——低频信号发生器

低频信号发生器主要用来产生频率范围为 $1\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ 的正弦波信号。有些低频信号发生器除了产生正弦波外,还能产生方波和脉冲波信号。低频信号发生器可用来测试无线电接收机、组合音响及各种电子设备中低频放大器的性能。

知识 2.1 低频信号发生器的组成

低频信号发生器的基本组成框图如图 3-2 所示。

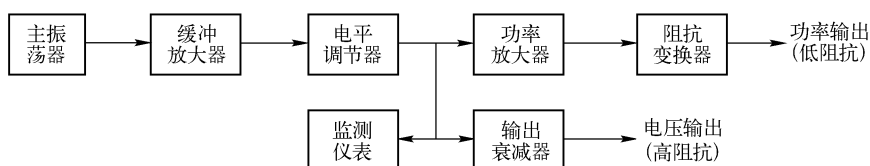


图 3-2 低频信号发生器的组成框图

1. 主振荡器

低频信号发生器的主振荡器用来产生低频正弦波信号，其振荡频率的调节范围即为信号发生器的有效频率范围。低频信号发生器主振荡器的电路形式主要有差频式振荡器和 RC 振荡器两类。

2. 缓冲放大器

缓冲放大器兼有缓冲和电压放大的作用。缓冲的目的是为了隔离后级电路对主振电路的影响，保证主振频率稳定，一般采用射（源）极跟随器或运算放大器组成的电压跟随器；电压放大的目的是为了对主振级产生的微弱振荡信号进行放大，使信号发生器的输出电压达到预定的值。要求放大器具有输入阻抗高、输出阻抗低（有一定的带负载能力）、频率范围宽、谐波失真小、工作稳定等性能。

3. 输出衰减器

输出衰减器用于改变信号发生器的输出电压或功率，通常分为连续调节和步进调节。连续调节由电位器实现，步进调节由电阻分压器实现。低频信号发生器中采用的输出衰减器如图 3-3 所示。由电位器 R_p 取出一部分信号电压加于由 $R_1 \sim R_8$ 组成的步进衰减器，调节电位器在不同位置，或调节波段开关 S 于不同挡位，均可使衰减器输出不同的电压。

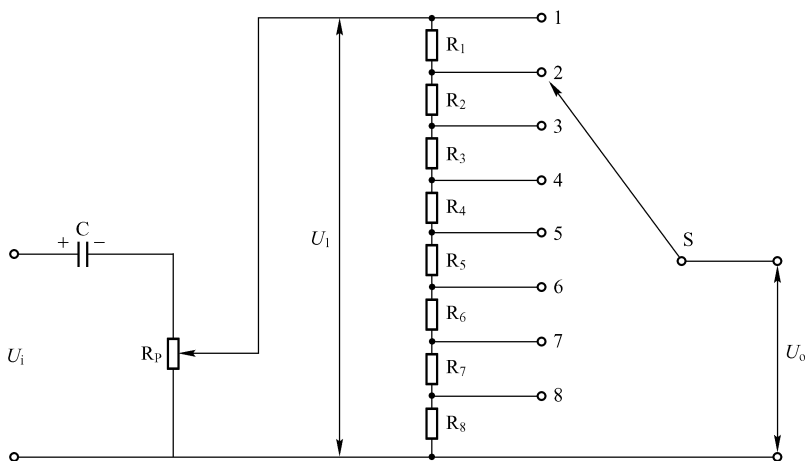


图 3-3 输出衰减器



信号发生器对步进衰减量的表示方法通常有两种,一种是直接用步进衰减器的输出电压 U_o 与输入电压 U_i 的比值来表示,即 U_o/U_i 。例如,当 $U_o/U_i = 0.1$ 时,表示为 $\times 0.1$ 。另一种是将上述的比值用分贝值表示,即 $20\lg(U_o/U_i)$,单位为 dB。例如,当 $U_o/U_i = 0.1$ 时,表示为 -20dB ,由于其比值总是小于 1,其对数都为负值,不会造成混淆,有时也省去负号。

4. 功率放大器

功率放大器对电平调节器送来的电压信号进行功率放大,使之达到一定的输出功率。要求功率放大器的输出阻抗低、工作效率高、谐波失真小。

5. 监测仪表

监测仪表主要有电压表和频率计。电压表用于指示输出信号的幅度,频率计用于指示输出信号的频率,它们可以是指针式的也可以是数字式的。

知识 2.2 主振荡器类型与工作原理

低频信号发生器的主振荡器电路形式有差频式振荡器和 RC 振荡器两类。

1. 差频式振荡器

差频式振荡器的原理框图如图 3-4 所示。它有两个高频振荡器,一个产生频率固定的振荡信号 f_1 ,另一个产生频率可变的振荡信号 f_2 ,两信号同时送入混频器,产生低频差频信号,经过低通滤波器去掉高频成分,再通过缓冲放大器放大,即可得到具有一定幅度的低频信号电压。

用这种方法产生的低频正弦波信号,其频率覆盖范围比较宽;缺点是频率稳定性差,特别是 f_1 与 f_2 接近时,极易产生干扰,因此很难获得较低的差频输出。

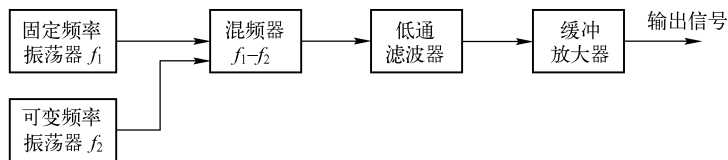


图 3-4 差频式振荡器原理框图

2. RC 文氏电桥振荡器

目前低频信号发生器大多采用 RC 文氏电桥振荡器,其电路组成如图 3-5 所示。

(1) 振荡器工作原理

RC 文氏电桥振荡器实际上是一种电压反馈式振荡器,它由负反馈放大器和一个具有选频作用的正反馈回路组成。图 3-5 中 R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 组成具有选频作用的串—并联正反馈



回路, R_1 和 R_f 为负反馈回路, 它们构成一个电桥, 放大器的输入信号取自电桥的两个对角线上, 输出信号则送至电桥的另两个对角线上。

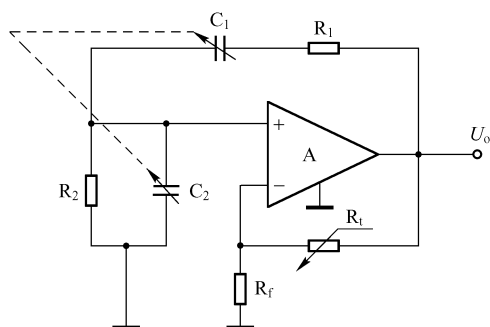


图 3-5 RC 文氏电桥振荡器

振荡器的频率调节是通过改变桥路电阻和电容值, 通常用波段开关改变 R_1 、 R_2 进行频率分段调节, 波段内的最高频率与最低频率比一般为 10。在同一波段中, 用同轴双联可变电容器改变 C_1 、 C_2 进行频率的连续调节。通常取 $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$ 。为满足振荡的振幅条件, 要求放大器的闭环增益等于 3, 这时振荡频率为

$$f_o = \frac{1}{\sqrt{2\pi RC}} \quad (3-3)$$

当放大器的增益很低时, 振荡器的工作稳定度较差。为了使振荡器易于起振, 并能维持振荡, 通常把放大器开环增益做得很高, 另加深度负反馈电路, 以保证输出良好的正弦波形。当 $R_1 = 2R_f$ 时, 可满足闭环增益等于 3 的要求。

(2) 幅度自稳定作用

接于负反馈支路中的电阻 R_f 是一只具有负温度系数的热敏电阻, 在电路中起着加速振荡过程的建立和自动稳定输出振幅的双重作用, 它的工作原理如下。

热敏电阻是一个非线性的温度敏感元件, 它的电阻值是温度的函数, 当交变电流流过 R_f 时, 在一个周期内, 阻值不会呈现明显的变化。但若电流持续流过电阻, 经过几个周期后, 其阻值就会随电流平均值而变化, 即具有时滞现象。

在 RC 振荡器中, 为满足起振条件, 必须在起振时使放大器有较高的增益, 但起振后维持振幅条件的增益却不能高, 若放大器仍具有很高的增益, 则电路会处于明显的非线性状态, 使输出正弦波的波形变差。接入负反馈电路, 并在电路中引入热敏电阻正是为了克服这一矛盾, 热敏电阻 R_f 在电路中起着稳定幅度的作用。

在起振时, 由于热敏电阻处于冷态, R_f 阻值比 R_1 大得多, 负反馈量很小, 闭环增益很高, 因而正反馈起主要作用, 有利于迅速建立振荡。起振后由于输出电压的作用, 流过 R_f 的电流增大, 使 R_f 的温度升高, 阻值逐渐降低, 负反馈量逐步减小, 最终达到稳定状态的需要量, 使输出电压的大小满足振幅平衡的需要。

在起振后, 若由于某种因素使放大器的增益升高时, 输出电压会随之增高, 在 R_1 和 R_f 上的电压也增高, 流过 R_f 上的电流加大, 使 R_f 的温度升高, 阻值减小, 负反馈量加大, 使放大器的闭环增益降低, 输出电压减小; 当放大器的增益降低时, 则向相反的方向变化, 从而保持振荡幅度的稳定。

知识 2.3 低频信号发生器的使用

低频信号发生器的型号很多, 但基本使用方法相似, 下面以常用的 XD-22B 型低频信号发生器为例, 说明其使用方法。XD-22B 型低频信号发生器的外形如图 3-6 所示。



图 3-6 XD-22B 型低频信号发生器外形图

1. XD-22B 型低频信号发生器的主要技术性能

(1) 输出波形

可输出正弦波、脉冲波、TTL 脉冲波。

(2) 频率特性

① 频率范围为 $1\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ ，分 6 个波段： $1 \sim 10\text{Hz}$ 、 $10 \sim 100\text{Hz}$ 、 $100\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$ 、 $1 \sim 10\text{kHz}$ 、 $10 \sim 100\text{kHz}$ 、 $100\text{kHz} \sim 1\text{MHz}$ 。

② 频率漂移：预热 30min 后，连续工作 8h 漂移 $\leq \pm 1\% \pm 1\text{Hz}$ 。

③ 频率响应： $20\text{Hz} \sim 1\text{MHz} \leq \pm 1\text{dB}$ 。

④ 正弦波失真： $\leq 0.3\%$ 。

⑤ 频率指示： $1\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ ，3 位数字显示，误差 $\leq \pm 1\% \pm 1\text{Hz}$ 。

(3) 输出特性

① 输出阻抗： $600\Omega \pm 10\%$ 。

② 输出幅度：正弦波： $0 \sim 6V_{\text{rms}}$ ，脉冲波： $0 \sim 10V_{\text{p-p}}$ 。

③ 输出衰减器：10、20、30、40、50、60、70、80dB 共 8 挡。

④ 电压指示： $0 \sim 6V$ ，误差 $\leq \pm 10\%$ 。

⑤ TTL 电平：高电平 $> 2.4\text{V}$ ，低电平 $< 0.3\text{V}$ ，可驱动 20 只 TTL 负载。

⑥ 脉冲占空比： $30\% \sim 70\%$ 。

2. XD-22B 型低频信号发生器的面板

XD-22B 型低频信号发生器的面板标示如图 3-7 所示，各开关旋钮功能说明如下。

- ① 电源开关 按下开关则电源接通，频率指示表数字亮；
- ② 频率范围开关 用于选择工作频率范围；
- ③ 频率调节旋钮 有 3 个旋钮，用于调节输出信号频率；
- ④ 频率微调旋钮 用于输出信号频率微调；
- ⑤ 占空比调节 用于调节脉冲信号的占空比；
- ⑥ 波形选择开关 用于选择输出正弦波或脉冲波；
- ⑦ 电压输出插座 电压信号输出端口，阻抗为 600Ω ；
- ⑧ TTL 输出插座 TTL 脉冲波输出端口，阻抗为 600Ω ；

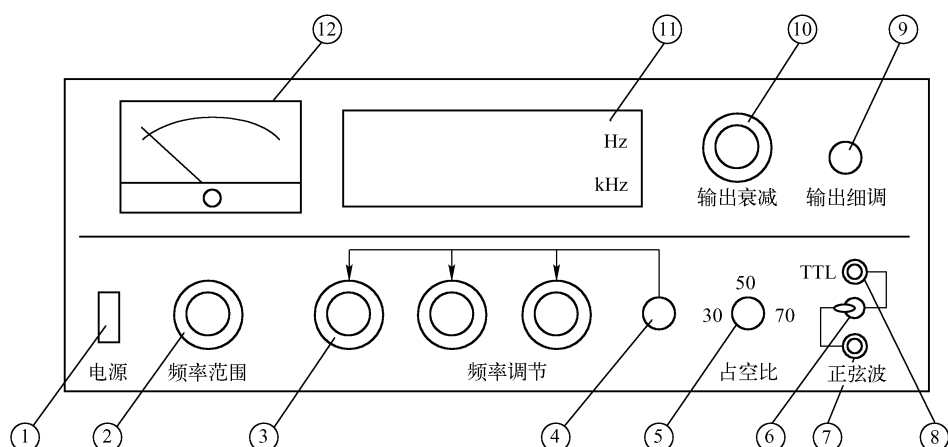


图 3-7 XD-22B 型低频信号发生器面板图

- ⑨ 输出幅度调节 用于调节输出电压的幅度；
⑩ 输出衰减开关 有 8 个挡位，用于输出信号的衰减；
⑪ 频率指示表 用于指示输出信号的频率；
⑫ 输出电压指示 指示值为正弦波电压的有效值（脉冲波除外）。

3. XD-22B 型低频信号发生器的使用

打开电源开关，应有频率指示，预热 15min，然后再开始使用。

例如要输出一个频率为 5kHz、电压幅度为 0.5V 有效值的正弦波信号，若输出端连接 600Ω 负载，则具体调节步骤如下：

先将输出波形选择置于“正弦波”，频率范围开关置于“10k”挡，然后调节“频率调节”和“频率微调”，使频率指示器指示为 5.00kHz。将衰减开关置于“20 dB”，调节输出幅度，使输出电压表指示值为 5V，则对应输出电压为 0.5V。

衰减分贝数与衰减倍数以及输出电压调节范围的对应关系见表 3-1。例如，将低频信号发生器的“输出衰减”开关置于 50dB 时，指示电压表的读数为 1V，这时查表 3-1 可知：50dB 所对应的衰减倍数为 316，故实际输出电压为 $U_o = 1/316 = 3.16 \text{ (mV)}$ 。

表 3-1 衰减分贝数与衰减倍数以及输出电压调节范围的对应关系

衰减分贝数	对应的输出衰减倍数	对应的电压调节范围
0	0	0 ~ 5V
10	3.16	0 ~ 1.58V
20	10	0 ~ 500mV
30	31.6	0 ~ 158mV
40	100	0 ~ 50mV
50	316	0 ~ 15.8mV
60	1000	0 ~ 5mV
70	3160	0 ~ 1.58mV
80	10000	0 ~ 0.5mV



任务3 仪器介绍——高频信号发生器

高频信号发生器是一种向电子设备和电路提供高频等幅正弦波和调制波的信号源，其工作频率一般为 $100\text{kHz} \sim 30\text{MHz}$ ，主要用于各种无线电接收机的灵敏度、选择性等参数的测量和调试。高频信号发生器按调制类型不同分有调幅信号发生器和调频信号发生器；按高频信号的产生方法不同又分有调谐信号发生器与合成信号发生器。

知识 3.1 高频信号发生器的组成

高频信号发生器的组成如图 3-8 所示。主要包括主振级、内调制振荡级、调制级、输出级、监测仪表及电源等几部分。由主振级产生的高频正弦波信号，经缓冲级进行缓冲放大，再经调制级进行调制后送至输出级，由内部衰减电路衰减后输出。

1. 主振级

主振级就是高频振荡器，其作用是产生高频等幅信号。主振级通常采用 LC 调谐振荡器，高档产品则采用频率合成器。LC 振荡器根据反馈方式不同，可分为变压器反馈式、电感反馈式和电容反馈式；频率合成器可分为直接频率合成和间接频率合成。

2. 内调制振荡器

调制信号分内调制和外调制两种。内调制振荡器就是内调制信号发生器。一般高频信号发生器的内调制信号有 400Hz 和 1kHz 两种。

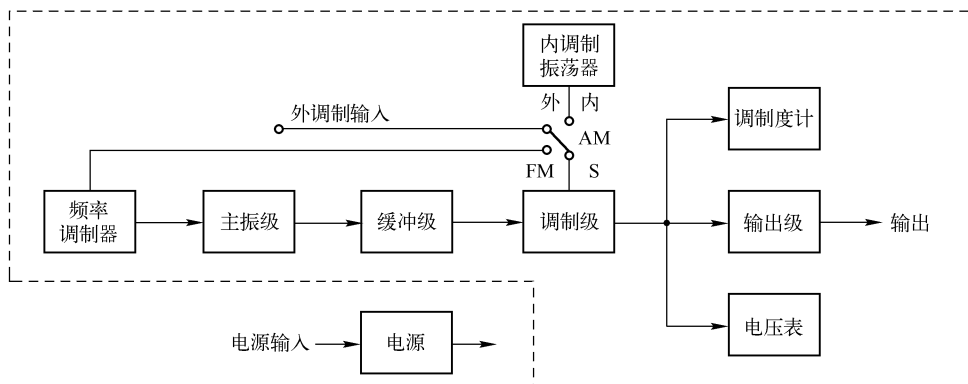


图 3-8 高频信号发生器的组成框图

3. 调制级

调制级的作用是进行幅度调制，将主振级产生的高频等幅信号（载波）与调制信号发生器产生的音频调制信号（ 400Hz 或 1kHz ）同时送到调制级，从调制级输出的就是载有音



频信号的调幅波；而调频则是直接对主振级进行频率调制。

4. 输出级

输出级的作用是对高频信号进行放大和滤波，在此基础上通过衰减器对输出信号进行衰减调节和输出阻抗变换，以适应各种不同的需要。输出级主要由放大器、滤波器、衰减器和阻抗变换器组成。

知识 3.2 主振级的类型和工作原理

高频信号发生器的主振级通常采用 LC 调谐振荡器或频率合成器。

1. LC 调谐振荡器

LC 振荡器根据反馈方式不同，可分为变压器反馈式、电感反馈式（又称电感三点式）和电容反馈式（又称电容三点式）三种振荡电路形式，如图 3-9 所示。通常通过切换振荡回路中不同的电感 L 来改变频段，通过改变振荡回路的电容 C 来对振荡频率进行连续调节。LC 振荡器的特点是电路结构简单、成本低，但频率稳定度较差，通常用于一般的高频信号发生器。

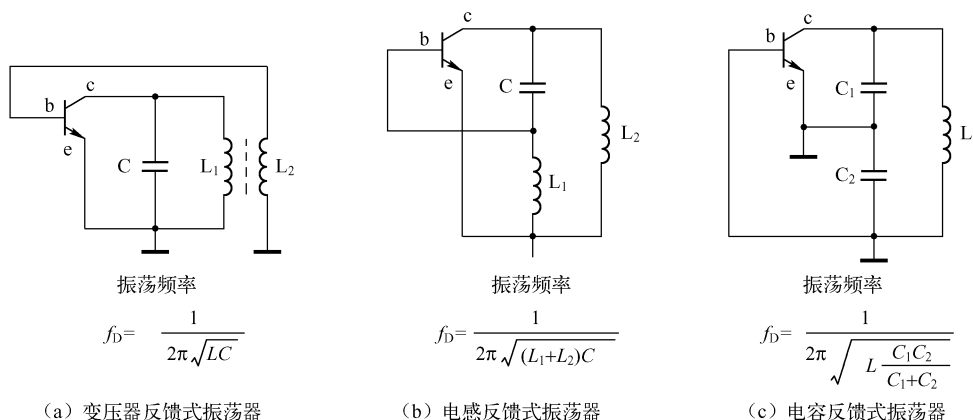


图 3-9 LC 调谐振荡器

2. 频率合成器

频率合成器是把一个（或少数几个）高稳定度频率源 f_s 经过加（产生和频）、减（产生差频）、乘（倍频）、除（分频）等运算，以产生在一定频率范围内，按一定的频率间隔变化的一系列离散频率信号。频率合成方法分有间接频率合成法、模拟直接频率合成法（ADFS）和数字直接频率合成法（DDFS）。

(1) 间接频率合成法

间接合成法又称为锁相合成法，是基于锁相环（PLL）的原理实现的。锁相环可以看作是中心频率能自动跟踪输入基准频率的窄带滤波器。如果在锁相环内加入相应电路就可以对



基准频率进行各种算术运算，产生所需要的频率。由于它不是直接对基准频率进行运算，故称为间接合成法。

锁相环由基准频率源（晶振）、鉴相器（PD）、低通滤波器（LPF）、压控振荡器（VCO），以及反馈环节几部分组成，如图3-10所示。

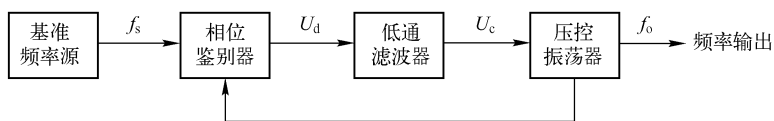


图 3-10 锁相环组成框图

其工作原理如下：基准频率和输出频率加到鉴相器上进行相位比较，其输出的误差电压与两信号的瞬时相位差成比例。误差电压经环路低通滤波器滤除其中的高频分量和噪声以后，用以控制压控振荡器，使其振荡频率 f_o 向输入频率 f_s 靠拢，直至锁定为止。环路一经锁定，则压控振荡器的频率就等于输入信号的频率。此时，两信号的相位差保持某一恒定值，鉴相器的输出电压也为一定值，振荡器就在此频率上稳定下来，此时输出频率就等于基准频率，即 $f_o = f_s$ 。

频率合成器中经常使用的一些基本锁相环路如图3-11所示。图中倍频式的倍频系数或分频式的分频系数，都能在频率预置时设定，使这些锁相环路中的压控振荡器处于锁相环的捕捉范围内，于是在环路的输出端即可得到输入信号的分频、倍频、混频（和频或差频）等频率的信号。

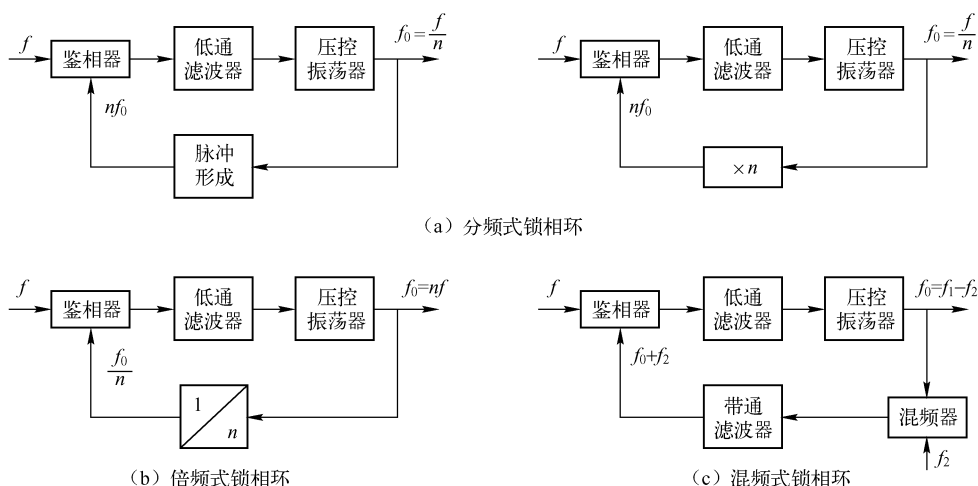


图 3-11 常用基本锁相环路

间接合成法具有良好的抑制寄生频率的能力，频率范围宽，调节方便，而且锁相环电路便于实现数字化、集成化，可在微机控制下工作。

(2) 模拟直接频率合成法

模拟直接频率合成法（ADFS），由于采用的是模拟电子技术，故称为模拟直接合成法。它是对基准晶体振荡器产生的标准频率信号，利用倍频器、分频器、混频器及滤波器等进行



一系列四则运算以获得所需要的频率输出。

在信号发生器中,常用的是连续混频分频电路,如图 3-12 所示。在该频率合成器中,首先使用频率为 $f_s = 5\text{MHz}$ 的辅助基准频率发生器,产生各种辅助基准频率信号: 2.0MHz , 2.1MHz , \dots , 2.9MHz , 然后用混频器和分频器进行频率运算,实现频率合成。

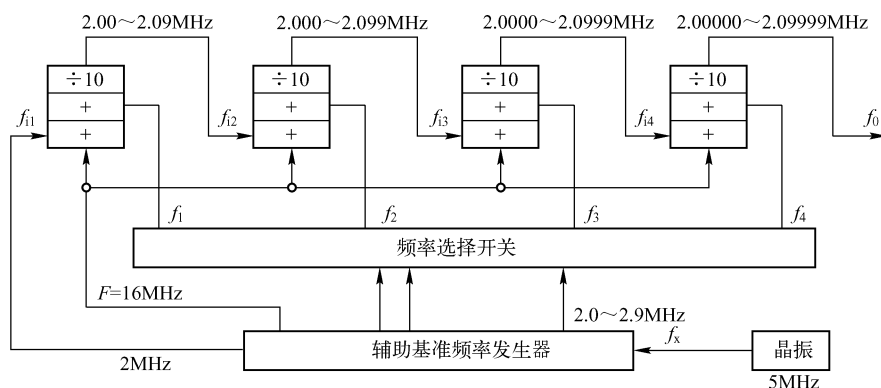


图 3-12 连续混频分频电路

图 3-12 中的频率选择开关是根据所需输出的频率值 f_o 从 $2.0 \sim 2.9\text{MHz}$ 中选择相应的数值分别作为 $f_1 \sim f_4$ 。图 3-12 中纵向的混频分频电路组成一个基本运算单元,这里有 4 个相同的单元,它们所产生的输出频率依次从左向右传递,并参与后一单元的运算。

例如从左边开始的第一单元,首先 f_{11} (2MHz) 和 F (16MHz) 进行混频,其结果再与辅助基准频率 f_1 进行混频,两次混频得

$$f_{11} + F + f_1 = [2 + 16 + (2.0 \sim 2.9)]\text{MHz} = (20.0 \sim 20.9)\text{MHz}$$

经 10 分频得 $(2.00 \sim 2.09)\text{MHz}$,再以该频率作为第二单元的输入频率与 f_2 继续进行运算。从左至右经过 4 次运算,最后得到输出信号的频率 f_o 为

$$f_o = (2.00000 \sim 2.09999)\text{MHz}$$

根据频率选择开关的状态,可以输出 1000 个频率值,频率间隔 $\Delta f = 1\text{Hz}$,即为此频率合成器的频率分辨率。如果串接更多的合成单元,就可以获得更多的频率值和更细的频率间隔,以进一步提高频率范围和频率分辨率。

直接模拟合成法的频率转换速度快,频谱纯度高,但由于它需要大量的分频器、混频器、滤波器,因而结构复杂,体积笨重。目前多用在实验室、固定通信、电子对抗和计量测试等领域。

(3) 数字直接频率合成法

数字直接频率合成法 (DDFS),它是近些年来迅速发展起来的一种新的频率合成方法,它将先进的数字处理理论与方法引入信号合成领域,通过控制相位变化速度来直接产生各种不同频率信号。

DDFS 的基本原理如图 3-13 所示。它是把一个单位振幅的正弦函数的相位在 2π 弧度内分成 A 个点,求出相应各点的正弦函数值,并用 D 位二进制数表示,写入 ROM 中构成一个所谓的正弦表。在高速、稳定的参考时钟控制下依次读出每个相位所对应的正弦函数值,经 D/A 转换得到需要的模拟信号,改变频率控制码即可控制输出信号的频率。

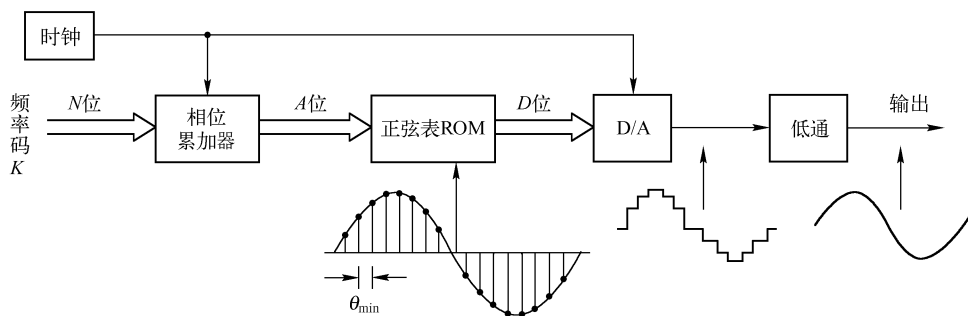


图 3-13 DDS 的基本原理

数字频率合成法与模拟频率合成法相比,具有频率分辨率高、频率转换快、相位连续、相位噪声小、便于实现复杂方式的信号调制、可在微机控制之下工作,由于它采用大规模集成电路,因此其体积小,功耗低,重量轻。

知识 3.3 高频信号发生器的使用

高频信号发生器的型号很多,但基本使用方法相似,下面以常用的 YB1051 高频信号发生器为例,说明其使用方法。YB1051 高频信号发生器的外形如图 3-14 所示。



图 3-14 YB1051 高频信号发生器外形图

1. YB1051 高频信号发生器的主要性能指标

- (1) 频率范围: $0.1 \sim 40\text{MHz}$, 分为 5 个波段, 数字显示, 误差 $< \pm 0.1\%$ 。
- (2) 输出幅度: 最大 $1V_{\text{rms}}$, 稳幅, 连续可调, 数字显示, 误差 $< \pm 0.3\%$ 。
- (3) 输出阻抗: 50Ω , $0 \sim 50\text{dB}$ 衰减。
- (4) 调制方式: 内 1kHz , 调幅深度 $0 \sim 5\%$ 连续可调; 调频频偏 $0 \sim 100\text{kHz}$ 连续可调。
- (5) 低频输出: 1kHz , 失真度小于 1% ; 输出幅度最大 $2.5V_{\text{rms}}$, 连续可调。

2. YB1051 高频信号发生器的面板

YB1051 高频信号发生器的面板图如图 3-15 所示, 各开关旋钮的功能说明如下。

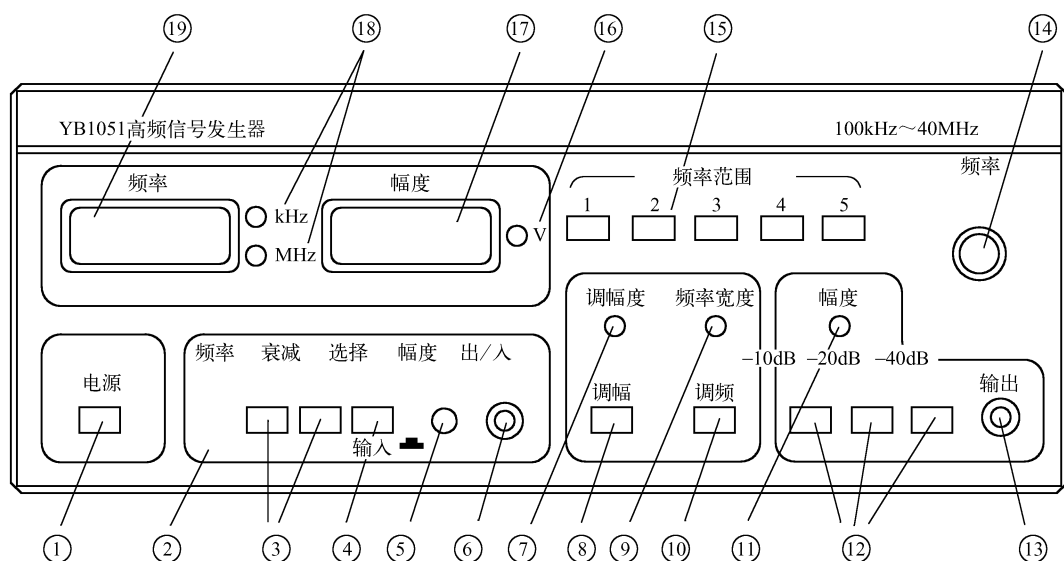


图 3-15 YB1051 高频信号发生器面板图

- ① 电源开关 按下开关电源接通，频率计、电压表数字亮；
- ② 音频频率选择 用于选择音频调制信号频率，按下为 400Hz，弹出为 1kHz；
- ③ 音频输出衰减 用于音频调制信号输出幅度的衰减，按下为衰减 10dB；
- ④ 音频输出/输入选择 按下为音频信号输出，弹出为外调制音频信号输入；
- ⑤ 音频输出幅度细调 用于调节音频输出信号幅度；
- ⑥ 音频输出/输入插座 音频信号输出或外调制信号输入端口；
- ⑦ 调幅度调节 用于调节调幅信号的调幅度；
- ⑧ 调幅选择按键 按下为选择调幅功能；
- ⑨ 频偏宽度调节 用于调节调频信号的频偏；
- ⑩ 调频选择按键 按下为选择调频功能；
- ⑪ 输出幅度细调 用于高频信号输出幅度的连续调节；
- ⑫ 输出幅度衰减 用于高频信号输出幅度的衰减，衰减量为 0 ~ 50dB；
- ⑬ 高频输出插座 高频信号输出端口；
- ⑭ 频率调节旋钮 用于连续调节高频输出信号的频率；
- ⑮ 频率范围选择 用于选择高频输出信号的频率范围；
- ⑯ 幅度单位指示 用于指示输出信号幅度的单位；
- ⑰ 输出幅度显示 指示输出信号幅度的有效值；
- ⑱ 频率单位指示 用于指示输出信号频率的单位；
- ⑲ 信号频率显示 指示输出信号的频率。

3. YB1051 高频信号发生器的使用

(1) 使用前的准备

按下电源开关，接通电源，LED 数码管亮，预热 15min，然后再开始使用。



(2) 音频信号输出

将音频输入/输出选择开关④弹出, 根据需要设置音频频率和幅度, 音频频率选择开关②按进为 400Hz, 弹出为 1kHz; 2 个输出衰减开关③可对输出幅度进行 0 ~ 30dB 的衰减, 同时可用输出幅度细调⑤调节, 以输出需要的幅度, 音频信号由插座⑥输出。

(3) 等幅高频信号输出

调幅开关⑧、调频开关⑩均弹出, 开关⑮选择合适挡位, 并调节⑭, 观察频率显示⑰, 使其达到需要的频率; 同时调节⑪, 观察幅度显示⑱, 使其达到需要的幅度, 3 个衰减开关⑫可对输出幅度进行 0 ~ 50dB 的衰减, 等幅高频信号由插座⑬输出。

(4) 调制波信号输出

使用内调制时, 输入/输出开关④弹出, 使用外调制时, 输入/输出开关④按进, 并将外调制信号接入插座⑥。选择需要的调制方式, 将调幅开关⑧或调频开关⑩按进, 根据需要调节调制波的载波频率和幅度; 调节⑦或⑨可改变已调波的调幅度或频偏宽度, 已调制信号由插座⑬输出。

任务4 仪器介绍——函数信号发生器

函数信号发生器是一种多波形信号源, 它能产生频率从 mHz 至 10MHz 的一些特定周期性时间函数信号。一般能产生正弦波、方波和三角波, 有的还可以产生锯齿波、矩形波(占空比可调)、正负脉冲波等, 有的还具有调频、调幅等调制功能。函数信号发生器可在电子产品生产测试、仪器维修和电路实验时用做信号源。

知识 4.1 函数信号发生器的类型

函数信号发生器按产生信号的方法分通常有脉冲式、正弦波式、三角波式三种类型。

1. 脉冲式函数信号发生器

脉冲式函数信号发生器是先产生脉冲和方波, 然后经变换得到三角波和正弦波, 其原理框图如图 3-16 所示。它包括脉冲发生器、施密特触发器、积分器和正弦波转换器等部分。

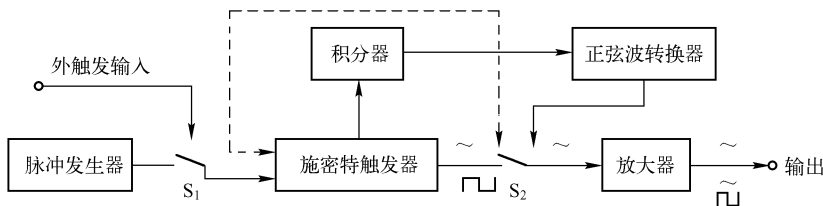


图 3-16 脉冲式函数信号发生器原理框图



脉冲发生器产生触发脉冲，施密特触发器在触发脉冲的作用下翻转，并产生方波，它可由内触发脉冲触发，也可由外触发脉冲提供触发信号，其输出方波信号频率由触发信号的频率所决定。方波信号送至积分器，在积分器输出端可得到三角波信号。通常积分器使用线性很好的密勒积分电路，调节积分器的积分时间常数 RC 的值，可改变积分速度，即改变输出的三角波斜率，从而可改变三角波的幅度。

也可按图 3-16 中虚线所示，将积分器输出的三角波信号反馈至施密特触发器的输入端，构成正反馈环路，组成振荡器。这时工作频率由反馈决定。由于将三角波引至施密特触发器的输入端作为反馈信号，而施密特触发器的触发电平又是固定的，所以这时调节 RC 值可改变到达触发电平所需的时间，从而可调节方波和三角波信号的频率，当 RC 数值很大时可获得频率很低的信号。三种波形由波形选择开关选择，经放大后输出。

2. 正弦波式函数信号发生器

正弦波式函数信号发生器是先产生正弦波，再得到方波和三角波，其组成框图如图 3-17 所示。它包括正弦振荡器、缓冲放大器、方波形成电路、积分器和输出电路等部分。

正弦波振荡器通常采用文氏电桥振荡器，输出正弦波的波形很好。其工作过程如下：正弦波振荡器输出正弦波，经缓冲放大级隔离放大后，分为两路信号，一路送输出放大器输出正弦波，另一路作为方波形成电路的输入信号。方波形成电路通常是施密特触发器，后者也输出两路信号，一路送输出放大器输出方波，另一路作为积分器的输入信号。积分器一般使用线性很好的密勒积分电路，它将方波积分形成三角波，三种波形的输出由波形选择开关选择，然后经放大器和输出电路输出。

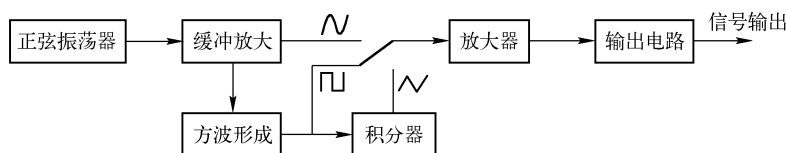


图 3-17 正弦波式函数信号发生器原理框图

3. 三角波式函数信号发生器

三角波式函数信号发生器是先产生三角波，再转换为方波和正弦波，其原理框图如图 3-18 所示。由三角波发生器产生三角波，然后分为两路，一路经方波形成电路产生方波，另一路经正

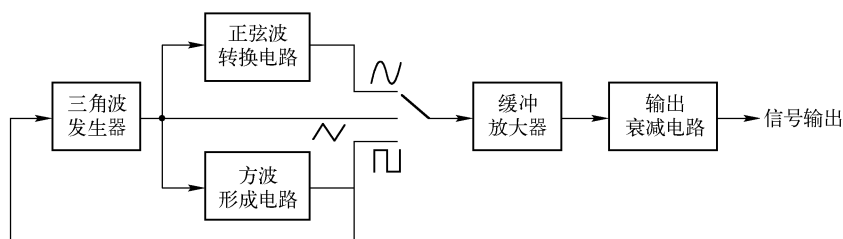


图 3-18 三角波式函数信号发生器原理框图



弦波形成电路形成正弦波。三角波、方波和正弦波信号经波形选择开关选择，再经缓冲放大器放大，最后由输出电路输出。

虽然方波是由三角波通过方波形成电路变换而来，但实际上三角波和方波电路是相互联系的，方波形成电路通常是三角波发生器的组成部分。

知识 4.2 三角波产生与正弦波变换

1. 三角波产生电路原理

三角波产生电路及波形如图 3-19 所示，它由电流源 I_1 、 I_2 、积分器和幅度控制电路（电平检测器）组成。利用正、负恒流源对积分电容充、放电，可产生线性很好的三角波。改变正、负电流源的输出电流，可改变三角波的充、放电速度，从而改变三角波的重复频率。

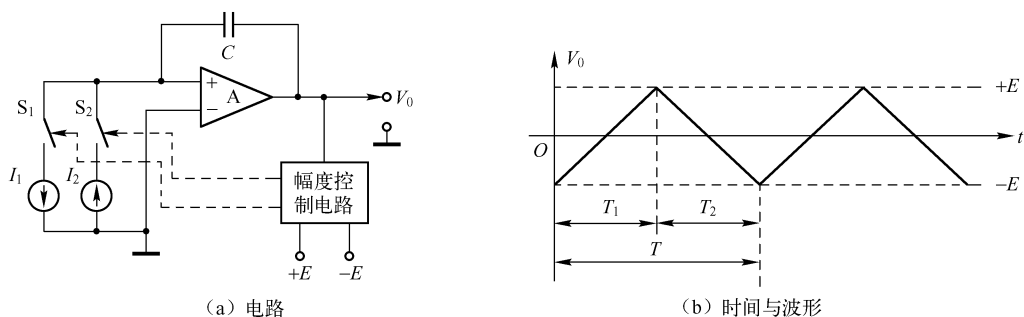


图 3-19 三角波产生电路及波形

正、负电流源的工作转换受幅度控制电路控制，它可用来交替切换送往积分器的充电电流的正、负极性，使积分器输出一定幅度的三角波信号，输出三角波的周期 T 为

$$T = T_1 + T_2 = \frac{2|E|C}{I_1} + \frac{2|E|C}{I_2} = \frac{4|E|C}{I} \quad (3-4)$$

当 $I_1 = I_2 = I$ 时产生对称三角波， $I_1 \neq I_2$ 时可产生锯齿波，改变电流 I 或积分电容 C 就可以改变三角波的频率，三角波的幅度取决于幅度控制电路的上、下门限电平。同时幅度控制电路可输出一定幅度的方波信号。

2. 正弦波变换电路原理

在函数信号发生器中，三角波—正弦波的变换，通常是将三角波通过非线性成形网络，用分段折线逼近的方法来实现。若一个电路具有如图 3-20 (a) 所示的电路特性，将三角波加到该电路后，就能得到如图 3-20 (b) 所示的波形。由图可见，这种网络对信号的衰减会随三角波幅度的加大而增加，产生削顶，从而使输出波形向正弦波逼近。如果折线段选得足够多，并适当选择转折点的位置，便能得到非常逼真的正弦波。

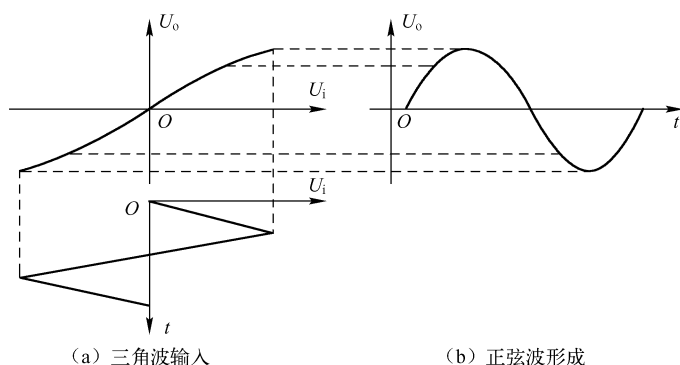


图 3-20 三角波—正弦波转换原理

实际的正弦波成形网络如图 3-21 所示。电路中使用了 6 对二极管。正、负直流稳压电源和电阻 $R_1 \sim R_7$ 及 $R'_1 \sim R'_7$ 给二极管提供适当的偏压，以控制三角波逼近正弦波时转折点的位置。随着输入电压的变化，6 对二极管依次导通或截止，把电阻 $R_8 \sim R_{13}$ 依次接入电路或从电路断开。电路中每个二极管可产生一个转折点。在正半周时，1 对二极管可获得 3 段折线，在负半周时也形成 3 段折线。这样使用 1 对二极管就可获得 6 段折线。以后每增加 1 对二极管，正/负半周可各增加 2 段折线。因此它可产生 26 段折线。由这种正弦波成形网络获得的正弦波信号失真小，用 5 对二极管时失真度可小于 1%，用 6 对二极管时可小于 0.25%。

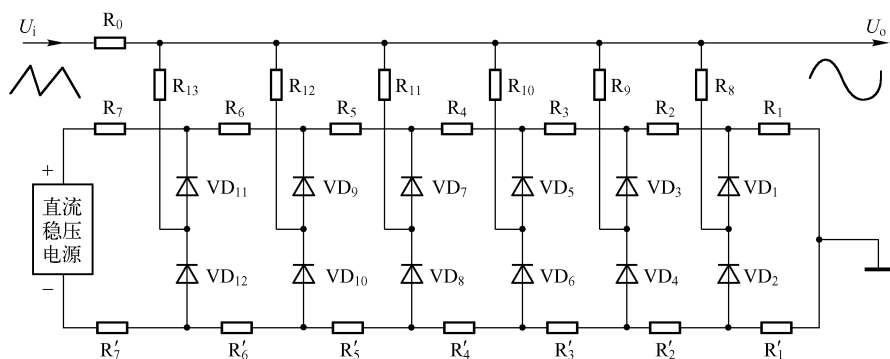


图 3-21 正弦波成形网络

知识 4.3 函数信号发生器的使用

函数信号发生器的型号很多，但基本使用方法相似，下面以常用的 YB 1602 型函数信号发生器为例，说明其使用方法。YB 1602 型函数信号发生器的外形如图 3-22 所示。

1. YB 1602 型函数信号发生器的主要性能指标

- (1) 频率范围：0.2Hz ~ 2MHz。
- (2) 输出波形：正弦波、方波、三角波、锯齿波、脉冲波。



图 3-22 YB 1602 型函数信号发生器外形图

- (3) 电压输出幅度: $20U_{P-P}$ ($1\text{ M}\Omega$), $10U_{P-P}$ (50Ω)。
- (4) 直流偏置电平: $\pm 10\text{V}$ ($1\text{ M}\Omega$), $\pm 5\text{V}$ (50Ω)。
- (5) 方波上升时间: 100ns 。
- (6) 输出阻抗: 50Ω 或高阻 ($1\text{ M}\Omega$)。
- (7) 占空比调节: $20\% \sim 80\%$ 。
- (8) 频率测量: $1\text{Hz} \sim 10\text{MHz}$, 5 位显示, 误差 $\leq \pm 1\% \pm 1$ 个字。
- (9) 累加计数: 5 位显示, 最大值 99999。
- (10) 电压测量: $0 \sim 10\text{V}_{P-P}$, 3 位显示。

2. YB 1602 型函数信号发生器的面板

YB 1602 型函数信号发生器面板图如图 3-23 所示, 各开关旋钮功能说明如下。

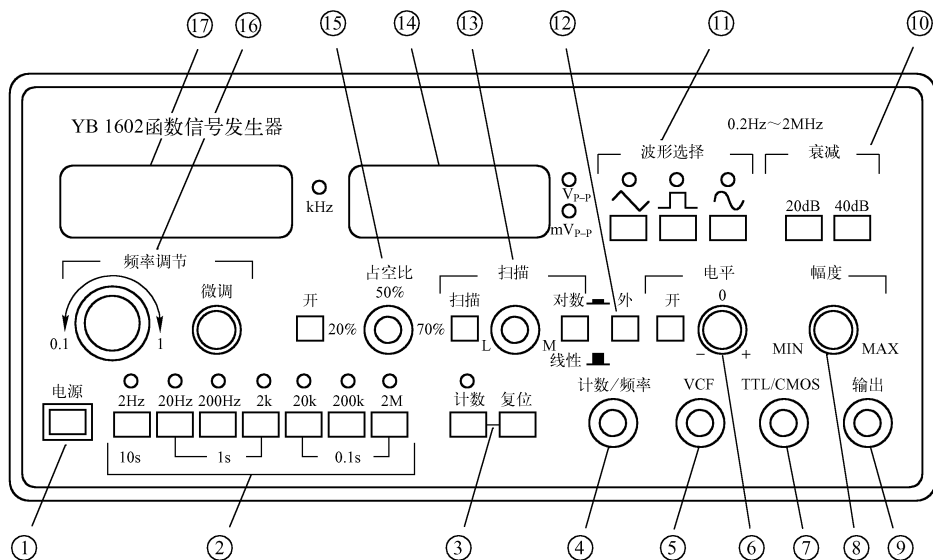


图 3-23 YB 1602 型函数信号发生器面板图

- ① 电源开关 开关按下电源接通, 频率计、电压表数字亮;
- ② 频率范围选择 按其中一键, 选择所需要的频率范围, 并兼频率计闸门时间选择;



- ③ 计数、复位开关 按计数键，频率计开始计数；按复位键，频率显示全为0；
- ④ 计数/频率插座 计数或外测频率信号输入插座；
- ⑤ VCF 输入插座 由此插座输入电压或调制信号，控制频率变化；
- ⑥ 直流偏置电平调节 按下电平开关，调节电平调节旋钮，可改变直流偏置电平；
- ⑦ TTL/CMOS 输出插座 由此插座输出 TTL/CMOS 电平信号；
- ⑧ 输出幅度调节旋钮 调节输出电压幅度；
- ⑨ 信号输出插座 电压信号由此插座输出；
- ⑩ 输出衰减开关 用于输出电压衰减，两挡开关组合为 20dB、40dB、60dB；
- ⑪ 波形选择开关 按下对应波形的键，选择需要的波形；
- ⑫ 外测频率开关 按下此开关，LED 显示窗显示外测信号频率或计数值；
- ⑬ 扫描开关及调节 按下扫描开关，信号输出端口输出信号为扫描信号，调节速率旋钮，可改变扫描速率，切换线性/对数开关可产生线性扫描或对数扫描；
- ⑭ 输出电压指示 为 3 位 LED 显示器，指示输出电压值；
- ⑮ 占空比开关及调节 按下占空比开关，占空比指示灯亮，调节占空比旋钮，可改变波形的占空比；
- ⑯ 频率调节旋钮 用于调节输出信号频率，一个粗调旋钮和一个微调旋钮，顺时针旋转，频率增大；逆时针旋转，频率减小。微调旋钮可以微调频率；
- ⑰ 信号频率指示 为 5 位 LED 显示器，指示输出信号的频率，当“外测”开关按下时，显示外测信号的频率。如超出测量范围，溢出指示灯亮。

3. YB 1602 型函数信号发生器的使用

(1) 使用前的准备

- ① 打开电源开关之前，先检查输入电源电压，再将电源线插入后面板上的电源插孔。
- ② 使电源开关、衰减开关、外测频率开关、电平开关、扫描开关、占空比开关弹出。
- ③ 打开电源，函数信号发生器默认为 10k 挡频率的正弦波，频率指示窗口显示输出信号的频率，预热 15 分钟再开始使用。

(2) 基本波形的产生

- ① 将波形选择开关 (WAVE FORM) 对应按下正弦波、方波、三角波，即可输出正弦波、方波、三角波。
- ② 输出频率调节：将频率选择开关置所需波段，频率计显示的频率将发生相应变化。调节频率调节旋钮，使频率计显示频率为所需频率。
- ③ 输出幅度调节：调节幅度旋钮 (AMPLITUDE) 顺时针旋转增大，最大波形幅度 $\geq 20U_{p-p}$ ；按下衰减开关，输出波形将被衰减。可按需要改变衰减量。将电压输出信号由 (VOLTAGE OUT) 插座通过连接线送入测试系统。
- ④ 偏置电平调节：将偏置电平开关按下，直流偏置电平调节旋钮顺时针旋转增大，最大变化量为 $\pm 10V$ (注意，信号超过 $\pm 10V$ 时被限幅)。
- ⑤ 占空比调节：占空比开关按下，其指示灯亮，当波形选择开关置“方波”时，调节占空比旋钮，方波可变成不同宽度的脉冲波；当波形选择开关置“三角波”时，调节占空比旋钮，三角波可变成锯齿波，正弦波输出时无效。



⑥ 计数和复位：按复位键，频率显示全 0。按计数键对输入信号计数，显示计数值。

(3) 其他功能的使用

① 外测频率：按下外测频率开关，外测指示灯亮。外测信号由计数/频率输入端输入。选择适当的频率范围，由高量程向低量程选择合适挡位，以确保测量精度。

② TTL 输出：由 TTL/CMOS 输出插座输出方波或脉冲波；该输出端可做 TTL/CMOS 数字电路实验的时钟信号源。

③ 压控调频 (VCF)：由 VCF 输入插座输入 1 ~ 5V 的调制信号。此时信号输出插座输出为压控调频信号。

④ 调频 (FM)：由 VCF 输入端口输入 10Hz ~ 20kHz 的调制信号，此时信号输出插座输出为调频信号。

任务5 应用实训——信号发生器应用实训

实训 5.1 低频放大器的性能测试（低频信号发生器的应用）

1. 实训目的

- (1) 学会低频信号发生器的使用方法；
- (2) 掌握低频放大器的性能测试技能。

2. 实训设备

低频信号发生器、低频交流毫伏表、数字式万用表、低频放大器、直流稳压电源。

3. 实训内容

低频放大器的性能测试，测试电路连接如图 3-24 所示，实训内容有以下几项。

(1) 测试低频放大器的电压放大倍数

用低频信号发生器产生 $f = 1\text{kHz}$ ， $U_i = 5\text{mV}$ 的正弦波信号，在低频放大器的静态工作点正常的基础上，接入电路输入端，负载电阻分别取 $R_L = 2\text{k}\Omega$ 和 $R_L = \infty$ ，用交流毫伏表测量输出电压值，计算 $f_o = 1\text{kHz}$ 时的电压放大倍数 $A_u = U_o / U_i$ ，把测试计算数据填入表 3-2 中。

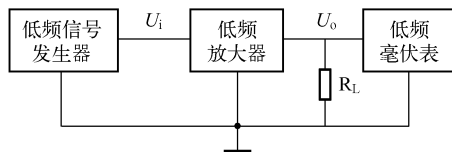


图 3-24 低频放大器测试连接电路图

表 3-2 电压放大倍数测试计算数据

$R_L (\Omega)$	$U_i (\text{mV})$	$U_o (\text{V})$	A_u
2k			
∞			



(2) 测试低频放大器的增益—频率特性（幅频特性）

采用逐点测试法测试放大器的幅频特性，测试方法如下：

保持低频放大器的输入信号在各频率时的 $U_i = 5\text{mV}$ 不变，改变低频信号发生器频率，在 $R_L = \infty$ 和 $R_L = 2\text{k}\Omega$ 两种情况下，用交流毫伏表测量不同频率时的输出电压 U_o ，计算相应的电压增益 A_u ，将测试计算数据填入表 3-3 中。

表 3-3 幅频特性测试计算数据

f (Hz)		5	10	50	100	500	1k	5k	10k	50k	100k
$R_L = \infty$	U_o (V)										
	A_u										
$R_L = 2\text{k}$	U_o (V)										
	A_u										

在图 3-25 中画出其幅频特性曲线，找出上、下限截止频率 f_H 和 f_L ，即增益下降到最大增益的 0.707（-3dB）时所对应的频率。在 f_H 和 f_L 两点左右可多测几点，并求出放大器的带宽 $B = f_H - f_L$ 。

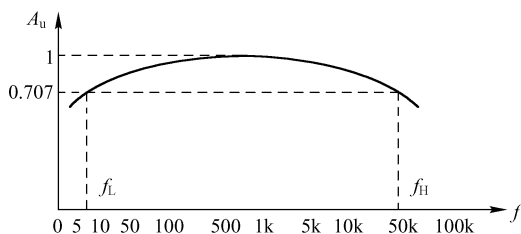


图 3-25 幅频特性曲线

(3) 测试低频放大器的线性工作范围

用低频信号发生器产生 $f = 1\text{kHz}$ 、不同电压值的正弦波信号，接入放大器的输入端，负载电阻分别取 $R_L = \infty$ 和 $R_L = 2\text{k}\Omega$ ，用交流毫伏表测量不同输入电压时的输出电压值，计算相应的电压增益 A_u ，将测试计算数据填入表 3-4 中，并在图 3-26 中画出其输入—输出特性曲线，并确定其线性工作范围。

表 3-4 线性工作范围测试计算数据

U_i (mV)		5	10	50	100	150	200	250	300	400	500
$R_L = \infty$	U_o (V)										
	A_u										
$R_L = 2\text{k}\Omega$	U_o (V)										
	A_u										

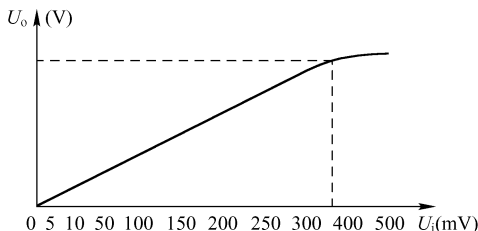


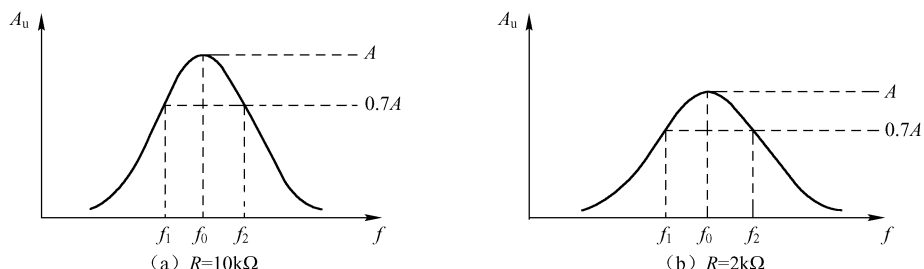
图 3-26 输入—输出特性曲线



续表

f (MHz)		8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5
$R = 2\text{k}\Omega$	U_o									
	A_u									

在图 3-28 中画出幅频特性曲线, 计算回路的通频带和 Q 值, 比较谐振回路并联电阻 R 不同的通频带, 分析 R 的值对通频带和 Q 值的影响。

图 3-28 R 不同的幅频特性曲线

(3) 测试调谐放大器的线性工作范围

用高频信号发生器产生 $f = 10.5\text{MHz}$ 、不同电压值的正弦波信号, 接入放大器输入端, 负载电阻分别取 $R_L = \infty$ 和 $R_L = 10\text{k}\Omega$, 用超高频毫伏表测量不同输入电压时的输出电压值, 计算相应的电压增益 A_u , 将测试计算数据填入表 3-7 中, 并在图 3-29 中画出其输出 - 输入特性曲线, 确定其线性工作范围。

表 3-7 线性工作范围测试计算数据

U_i (mV)		5	10	50	100	150	200	250	300	400	500
$R_L = \infty$	U_o (V)										
	A_u										
$R_L = 10\text{k}\Omega$	U_o (V)										
	A_u										

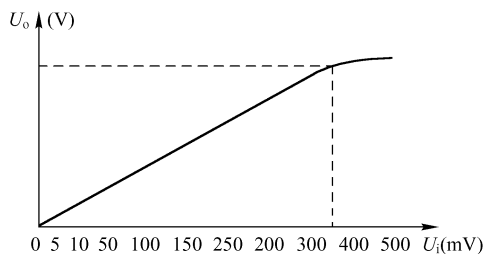


图 3-29 输入—输出特性曲线

实训 5.3 不同波形信号的电压测量 (函数信号发生器的应用)

1. 实训目的

(1) 学会函数信号发生器的使用方法;



(2) 掌握不同类型电压表的测量特性。

2. 实训设备

函数信号发生器、均值电压表、峰值电压表、有效值电压表。

3. 实训内容

由函数信号发生器输出频率为 1kHz、有效值电压不同的正弦波、方波和三角波信号，分别用有效值刻度的峰值电压表、均值电压表进行测量，将测量数据填入表 3-8 中，并计算最大相对误差 γ 。分析不同类型电压表对不同波形电压的测量特性。

表 3-8 不同波形电压的测量计算数据 (V)

真有效值电压表		0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	γ
峰值电压表	正弦波										
	方波										
	三角波										
均值电压表	正弦波										
	方波										
	三角波										

本项目小结

1. 信号发生器的类型很多，通常可按输出波形分类、按输出信号频率分类、按信号产生方式分类。一般信号发生器由振荡器、变换器、放大器、指示器、输出电路及电源等几部分。信号发生器的性能通常用频率特性、输出特性和调制特性三大指标来评价。

2. 低频信号发生器产生 1Hz ~ 1MHz 的正弦波信号。一般用文氏电桥振荡电路做主振级产生正弦波信号，通过电压和功率放大，再配以衰减器和阻抗匹配器，以适应不同负载及不同幅度输出信号的需要。

3. 高频信号发生器既可产生等幅的高频正弦波信号，也可产生调幅或调频信号，主要为无线电接收设备和高频电子线路调试提供所需的各种模拟射频信号。高频信号发生器用 LC 振荡电路或频率合成器做主振级，可进行内调制，也可进行外调制。信号经缓冲放大再由分压器衰减后输出。

4. 函数信号发生器是一种能产生多波形信号的通用仪器。其输出频率可低至 mHz，高至 MHz，输出信号波形有方波、三角波、正弦波、锯齿波和脉冲波等。通常先产生一种波形，然后用适当的电路对其进行变换，产生其他信号波形。有的函数信号发生器还可以对信号进行调制，调幅或调频，内调制或外调制，也可以扫频。信号经缓冲放大或功率放大再由分压器衰减后输出。



项目 3 思考题

1. 按输出波形不同信号发生器如何分类？各适用于哪些应用场合？
2. 按信号频率不同信号发生器如何分类？各适用于哪些应用领域？
3. 信号发生器一般由哪几部分组成？常用信号发生器有哪几种类型？
4. 信号发生器的性能指标有哪几类？主要有哪些指标？
5. 低频信号发生器的主振荡器电路形式有哪些？
6. 简述文氏电桥振荡器的工作原理。
7. 高频信号发生器的主振荡器电路形式有哪些？
8. 简述直接数字频率合成 DDFS 的工作原理。
9. 函数信号发生器的结构类型有哪些？
10. 简述三角波到正弦波的变换原理？
11. 如何正确选择和合理使用信号发生器？



项目4 电子示波器及应用



本项目任务目标

1. 学习电子示波器基本知识：应了解电子示波器测量的特点，电子示波器的分类、基本组成和发展趋势；
2. 学习示波器波形显示原理：应了解示波管的构造、电子束聚焦和偏转原理、波形显示和 $X-Y$ 显示原理；
3. 学习通用电子示波器的相关知识：应了解通用电子示波器的组成、技术指标，掌握通用电子示波器的使用方法；
4. 学习数字存储示波器的相关知识：应了解数字存储示波器的性能特点、结构组成和工作原理、掌握数字存储示波器的应用；
5. 进行通用电子示波器的应用实训：通过训练了解电子示波器的基本测量功能，掌握信号波形参数测量和低频放大器性能测试的基本技能。

任务1 知识引领——电子示波器基本知识

电子示波器是一种用荧光屏显示电量随时间变化过程的电子测量仪器（电子图示测量仪器）。由于电子示波器具有直观和快捷的优点，其他非电物理量也可经过各种传感器转换成电量，使用示波器进行观测，因此，电子示波器是一种应用非常广泛的电子测量仪器，同时也是构成其他图形显示仪器的基础。

知识 1.1 电子示波器的性能特点

电信号大都是时间的函数 $f(t)$ ，电子示波器是时域测试的典型仪器，在示波器屏幕上，可用 X 轴代表时间，用 Y 轴代表 $f(t)$ ，用电子束扫描的方法描绘出被测信号随时间的变化过程。同时，电子示波器又是一台 $X-Y$ 图示仪，只要把两个相关的电信号，分别加至示波器的 X 轴和 Y 轴，就可以在荧光屏上显示这两个变量之间的关系。与其他测量仪器相比，电子示波器具有以下一些特点。

(1) 具有直观性

示波器可直接显示各种电信号波形，测量速度快，可显示信号的瞬时变化情况。



(2) 工作频带宽

示波器可观察高速变化波形的细节, 目前示波器的工作频带可达 1GHz 以上。

(3) 测量灵敏度高

示波器可测量很微弱的信号, 目前示波器的最高灵敏度可达到 $10\mu\text{V}/\text{div}$ (格)。

(4) 测量参数多

示波器可以观测电信号随时间变化的波形, 通过屏幕显示能直接测量信号的幅度、周期、频率和相位等参数, 还可以测量脉冲信号的上升时间、下降时间、脉冲宽度、上冲和下冲等参数。

(5) 输入阻抗高

示波器的输入阻抗一般都在 $1\text{M}\Omega$ 以上, 对被测信号的影响极小。

(6) 过载能力强

示波器的输入电压可大大超过测量范围, 具有很强的过载能力。

知识 1.2 电子示波器的分类

电子示波器类型很多, 根据工作原理可分为模拟示波器和数字示波器两大类。根据不同测试领域的特点, 又有多种不同用途的示波器。根据测量性能和用途, 电子示波器可分为以下几类。

(1) 通用示波器

通用示波器是采用单束示波管, 应用示波器基本显示原理构成的单踪或双踪示波器。从使用功能上看, 通用示波器的通用性强, 能对一般电信号进行定性和定量测量, 可满足大多数测量的需要。按垂直通道的带宽又可分为低频示波器 (带宽 $\leq 1\text{MHz}$)、普通示波器 (带宽为 $5 \sim 60\text{MHz}$)、宽带示波器 (带宽 $\geq 60\text{MHz}$) 三种。

(2) 多束示波器

多束示波器是采用多束示波管构成的多线示波器。在屏幕上可同时显示两个以上的波形, 它的每个波形分别由单独的电子束产生, 观察和比较多个波形时非常方便。

(3) 取样示波器

取样示波器是采用等效取样技术构成的示波器, 通过等效取样, 将高频信号转换为低频信号, 再用普通示波器电路进行测量, 使被观测信号的周期大大展宽, 提高了 Y 通道带宽, 适合于观测频率很高的信号。

(4) 记忆示波器

记忆示波器是采用记忆示波管构成的示波器, 它使用记忆示波管来存储信号, 除了具有通用示波器的功能外, 还具有记忆波形的能力。

(5) 数字存储示波器

数字存储示波器是采用数字存储技术构成的数字示波器, 它将被测模拟信号经 A/D 转换进行数字化后写入存储器中, 需要读出时, 再经 D/A 转换还原为原来的模拟信号波形, 然后在示波管上显示出来。

(6) 特种示波器

特种示波器是指具有特殊用途的示波器, 它是为满足特殊需要而设计的, 如矢量示波



器、高压示波器、螺旋扫描示波器等。

知识 1.3 电子示波器的性能指标

电子示波器的技术指标很多，其中主要有以下一些。

(1) 频带宽度

频带宽度是表征示波器的最高频率响应能力，通常用测量频率上限或上升时间表示，两者的换算关系为：上升时间 = $0.35/\text{频带宽度}$ 。

(2) 垂直灵敏度

垂直灵敏度是表征示波器能够测量最小信号的能力，一般用 V/cm 或 V/div（格）表示，其电压值越小，灵敏度越高。

(3) 输入阻抗

输入阻抗一般用输入电阻和输入电容来表示，由于示波器测量时是与被测信号并联，所以输入阻抗越高（输入电阻大、输入电容小），对被测信号的影响越小。

(4) 扫描速度

扫描速度是指扫描光点水平移动的速度，一般用 cm/s 或 div/s 表示。其倒数称为扫描时间因数，用 s/cm 或 s/div 表示，它说明了示波器能观测的时间范围。

(5) 同步电压

同步电压又称触发电压，它是指使示波器波形稳定的最小输入信号电压，小于此值时，示波器不能显示稳定的波形。

随着数字化测量技术和微计算机技术的发展与应用，示波器正在由模拟示波器向数字示波器发展，使示波器的性能指标得到了很大的提高，目前示波器已发展成为集显示、测量、运算、分析、记录等各种功能为一体的智能化测量仪器。

任务2 知识引领——示波器波形显示原理

知识 2.1 阴极射线示波管的构造

阴极射线示波管（CRT）是示波器的主要器件。示波管主要由电子枪、偏转系统和荧光屏三部分组成。它们都被密封在真空的玻璃壳内，其基本结构如图 4-1 所示。

1. 电子枪

电子枪由灯丝 F、阴极 K、栅极 G1 和 G2，阳极 A1、A2 和 A3 组成。当灯丝加热阴极后，涂有氧化物的阴极发射大量的电子。控制栅极 G1 对 K 的负电位是可变的，起着调节电子密度进而调节光点亮度的作用。G1 的电位越负，打到荧光屏上的电子数越少，图形越暗，调节 G1 电位的电位器常称为“辉度”调节。G2、A1、A2 的电位均高于 K，它们与 G1、K 共同组成聚焦系统，对电子束进行聚焦和加速。通常第二栅极 G2 与第二阳极 A2 相连，对

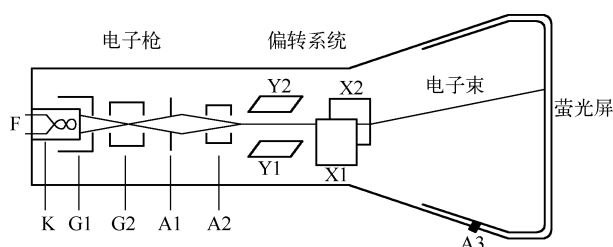


图 4-1 示波管基本结构示意图

阴极来说它们具有相同的高电位，这个电位一般接近地电位，这可以避免在 A2 和偏转板间形成电场，造成散焦。A1 的电位通常低于 A2，所以电子在离开聚焦系统时的速度主要由 A2 确定。

2. 偏转系统

示波管中有一对 X 偏转板和一对 Y 偏转板，X 偏转板水平放置，Y 偏转板垂直放置，每对偏转板都由基本平行的金属板构成。两板之间相对电压的变化将影响电子运动的轨迹。Y 偏转板上电位的变化只影响光点在屏上的垂直位置，X 偏转板上电位的变化只影响光点的水平位置，两对偏转板共同配合，决定了任一瞬间光点在屏上的坐标。

3. 荧光屏

荧光屏的形状有圆形和矩形两种。在示波管荧光屏的内壁上涂有荧光物质，在电子束的轰击下可发光，发光颜色由荧光物质决定。靠近荧光物质有一层透明铝膜，铝膜可使热量较快散发，此外，还能吸收荧光物质发出的二次电子和光束中的负离子，对荧光还有反光作用，使显示的图形更加清晰。电子束从荧光屏上移去后，光点仍能保留一段时间才消失，这段时间称为余辉时间，不同荧光材料的余辉时间也不同，小于 $10\mu\text{s}$ 的为极短余辉， $10\mu\text{s} \sim 1\text{ms}$ 为短余辉， $1\text{ms} \sim 0.1\text{s}$ 为中余辉， $0.1 \sim 1\text{s}$ 为长余辉，大于 1s 为极长余辉。示波器的工作频率越高，示波管的余辉时间要求越短，反之余辉时间要求越长。使用示波器时，应避免高亮度光点长时间停留在一个位置，这会降低荧光屏的发光效率，严重时还可能将荧光屏该处烧成一个黑点。

知识 2.2 电子束聚焦与偏转原理

1. 电子束聚焦原理

在电子枪中，由 G2、A1、A2 之间的非均匀电场形成主聚焦电场，由 K、G1、G2 之间的非均匀电场形成辅助聚焦电场，参见图 4-2。电子束以一定的发散角穿过非均匀电场后，将得到会聚力，并以一定的会聚角向轴线靠拢。以不同的发散角进入非均匀电场的电子，将得到不同的会聚力，以不同的会聚角向轴线靠拢，最终会聚到荧光屏的一点上。

2. 电子束偏转原理

在一定范围内，荧光屏上光点偏移中心的距离与偏转板上所加电压成正比，这就是用示波管观测波形的理论根据。下面以 Y 偏转板为例说明电子束偏转原理，参见图 4-3。

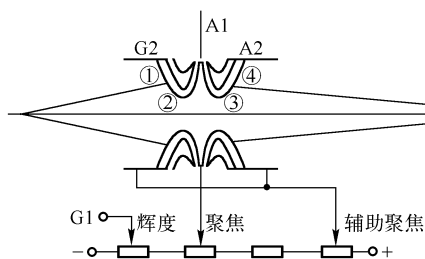


图 4-2 电子束聚焦原理图

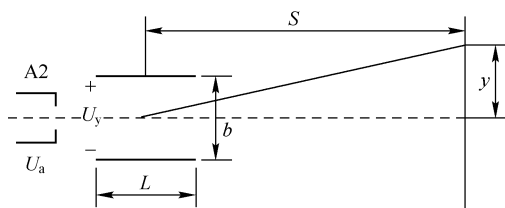


图 4-3 电子束偏转原理

在偏转电压 U_y 的作用下，Y 方向的偏转距离 y 可表示为

$$y = \frac{LS}{2bU_a} U_y \quad (4-1)$$

式中， L 为偏转板的长度； S 为偏转板中心到屏幕中心的距离； b 为偏转板之间的距离； U_a 为第二阳极电压。

由式 (4-1) 可知，偏转板间的相对电压 U_y 越大，形成的偏转电场越强，偏转距离越大；偏转板长度 L 越长，偏转电场作用距离越长，偏转距离越大；偏转板到荧光屏之间的距离 S 越大，偏转距离也越大。对于同样的偏转电压 U_y ，若板间距离 b 越大，电场强度减小，偏转距离会减小。同时，若第二阳极电压 U_a 越高，电子在轴线方向运动速度越高，穿过偏转板所用的时间减少了，电场对它的作用减小，偏转距离也会减小。

当示波管确定之后， L 、 b 、 S 均固定，第二阳极的电压 U_a 也基本不变，所以 Y 方向的偏转距离 y 正比于偏转板上的电压 U_y ，即

$$y = h'_y U_y \quad (4-2)$$

式中，比例系数 h'_y 称为示波管的偏转因数，单位为 cm/V ，它的倒数称为示波管的偏转灵敏度，单位为 V/cm 。

偏转灵敏度是示波管的重要参数，它的值越小，示波管的灵敏度越高，观察微弱信号的能力越强，通常 X 偏转灵敏度为 $60 \sim 20 \text{V/cm}$ ，Y 偏转灵敏度为 $40 \sim 10 \text{V/cm}$ 。

3. 后加速阳极的作用

由偏转式 (4-2) 可知，要想提高示波管的偏转灵敏度，可以考虑增加偏转板的长度 L 和偏转板到荧光屏的距离 S ，也可减小偏转板间的距离 b 或降低第二阳极上的电压 U_a 。但是，增加 L 必将加大电子穿越偏转板的渡越时间，而在电子渡越时间内偏转板上的电压应基本不变，这样才能使电子的偏转与被观测波形上的某一点有确定的对应关系。 L 的长度应保证远小于被观测信号的波长，因此，加长 L 必然影响示波器的高频工作；增大 S 的方法也不可取，它不但会使示波管过长，还会造成散焦；若是减小偏转板间的距离 b 必然限制电子束的偏转角度；而降低第二阳极电压 U_a 会影响电子的运动速度，最终造成亮度下降，这些都是不希望的。

为此，在偏转板至荧光屏之间再加一个后加速阳极 A3，它能使穿过偏转板的电子束沿轴向得到较大的速度。这种降低第二阳极电压并采用后加速阳极的系统称为先偏转后加速系统。加速阳极放置在靠近荧光屏的位置上，通常为石墨导电层，通过金属卡座与高压电源相连，A3 电压一般在数千伏至上万伏，使用中应注意安全。



知识 2.3 示波器波形显示原理

1. 扫描显示方式

将一个线性锯齿波电压加在 X 偏转板上, 根据偏转原理, 电子束在 X 方向的位置就会随锯齿波电压的幅度变化。由于锯齿波是随时间线性变化的, 所以, 光点在荧光屏上形成一条反映时间变化的直线, 称为时间基线, 当锯齿波电压达到最大值时, 光点达到最右端, 然后锯齿波电压迅速返回起始点, 光点也迅速返回最左端。光点在锯齿波作用下扫动的过程称为扫描, 能实现扫描的锯齿波电压称为扫描电压。光点自左向右扫动称为扫描行程, 光点自右端返回起点称为扫描回程。

在扫描电压作用的同时, 将一定幅度的被测信号 $f(t) = U_m \sin \omega t$ 加到 Y 偏转板上, 电子束就会在沿水平运动的同时, 在 Y 方向按信号规律变化, 任一瞬间光点的 X 、 Y 坐标分别由这一时刻的扫描电压和信号电压共同决定。扫描电压与信号电压同时作用到 X 、 Y 偏转板的情形如图 4-4 所示。

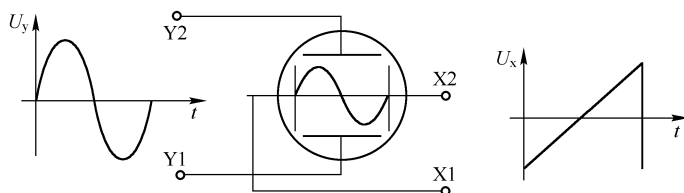


图 4-4 扫描电压与信号共同作用时的波形

2. 扫描电压与信号的同步

当扫描电压的周期 (T_n) 是被观察信号周期 (T_x) 的整数倍时, 即 $T_n = N T_x$ ($N = 1, 2, 3, \dots$), 扫描的后一个周期描绘的波形与前一周期完全重合, 荧光屏上得到稳定的波形, 此时, 扫描电压与信号同步, 同步时的波形如图 4-5 所示。

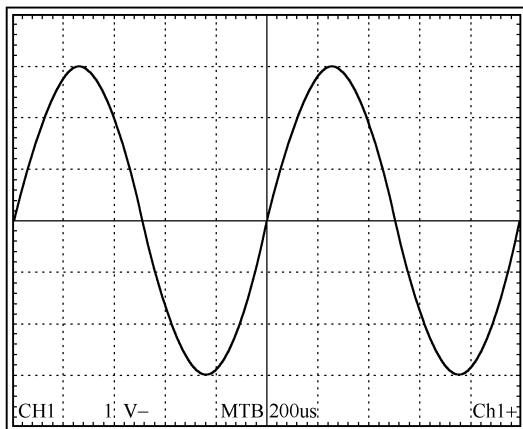


图 4-5 同步时的波形



当扫描电压的周期 (T_n) 不等于被测信号周期 (T_x) 的整数倍时, 扫描的后一个周期描绘的波形与前一周期描绘的波形不重合, 荧光屏上看到的是一个移动的波形, 此时, 扫描电压与信号不同步, 不同步时的波形如图 4-6 所示。

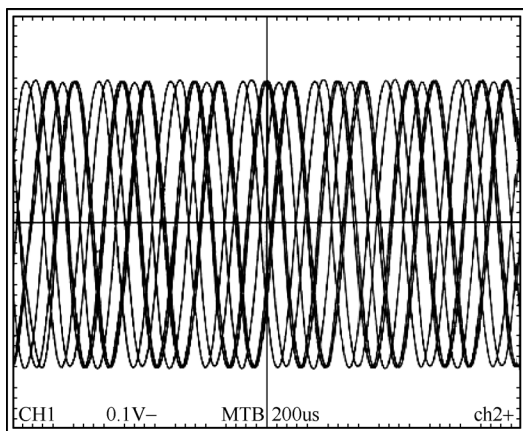


图 4-6 不同步时的波形

3. 连续扫描和触发扫描

以上分析是观测连续信号的情况, 这时扫描电压也是连续的。这种扫描方式称为连续扫描。连续扫描时, 扫描电压发生器处于自激状态, 不用触发信号也可以自动形成扫描线。当观测占空比 (τ/T_s) 很小的脉冲信号时, 使用连续扫描就不能正常观测信号。此时情况可用图 4-7 说明。

若选择扫描周期等于信号周期 ($T_n = T_x$), 脉冲信号被按比例压缩到屏幕左端 (图 4-7 (b)), 无法观测脉冲波形的细节 (上升时间、下降时间、脉冲宽度等)。若选择扫描周期等于脉冲宽度 ($T_n = \tau$), 在一个脉冲周期内, 光点在水平方向进行多次扫描, 其中只有一次是扫描脉冲信号, 其他多次扫描只在水平基线上往返运动, 结果在屏幕上显示的脉冲波形本身非常暗淡, 而时间基线却很明亮, 无法正常观测 (图 4-7 (c) 所示)。

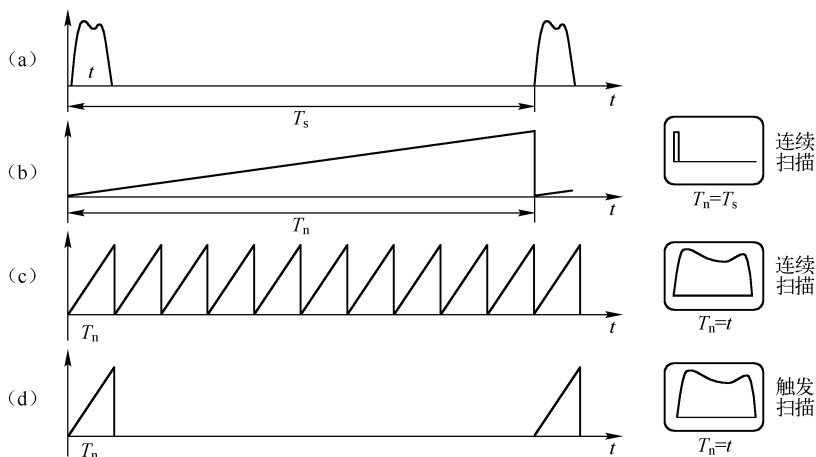


图 4-7 连续扫描和触发扫描波形



利用触发扫描可解决上述脉冲测量的困难。触发扫描的特点是，只有在被测脉冲到来时才形成一次扫描，如图 4-7 (d) 所示。此时的扫描发生器工作在单稳状态，无触发信号时处于等待状态。只有当触发脉冲到来时才产生一个扫描电压。只要选择扫描电压的持续时间等于或稍大于脉冲底部宽度，则脉冲波形就可展宽到整个屏幕。同时由于在两个脉冲间隔时间内没有扫描，故不会产生很亮的时间基线。通用示波器的扫描电路一般均可设置在连续扫描或触发扫描两种方式下工作。

4. 扫描过程的增辉和隐熄

上面的分析都假定扫描回程时间为零，实际上回扫是需要一定时间的，为了在荧光屏上不显示回扫过程，可采用增辉行程或隐熄回程的办法，将电子束在回程期间关闭。

增辉是对应扫描行程，隐熄则是对应扫描回程。若增辉行程，应在示波管的控制极加正方波，正方波宽度对应了扫描电压的行程。若隐熄回程，应在示波管的控制极加负方波，负方波宽度对应了扫描电压的回程。实现增辉或隐熄的电平为相对值，应保证高电平期间 U_{GK} 仍小于零，低电平期间使电子束完全截止。增辉与隐熄波形关系见图 4-8。

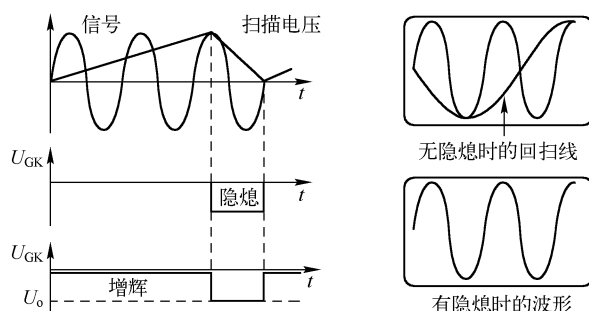


图 4-8 增辉与隐熄波形

5. $X-Y$ 显示方式

在示波管中，电子束同时受 X 和 Y 两个偏转板的作用，由两个偏转板上的电压共同决定光点在荧光屏上的位置。所以，示波器又是一个 $X-Y$ 图示仪。

将两个同频率、同幅度的正弦信号分别加到 X 、 Y 偏转板上，如果 X 、 Y 两个通道具有相同的灵敏度，改变两信号的相位差，荧光屏上会出现不同形状的图形。当相位差取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 几个典型值时，荧光屏上则显示出不同倾斜度的直线、椭圆和圆，这种图形称为李沙育图形，可用来测量频率或相位差。图 4-9 第一行给出了两个同频信号不同相位差时的图形，第二行给出了 $F_y = 2F_x$ 不同相位差时的图形。

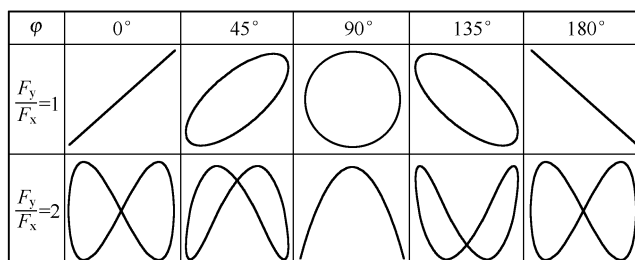


图 4-9 不同频率比和相位差的李沙育图形



任务3 仪器介绍——通用电子示波器

知识3.1 通用电子示波器的组成

通用电子示波器是使用量最多的示波器，通常具有两个输入通道，构成双踪示波器。通用双踪示波器由垂直系统、水平系统、示波管及控制电路、校准信号源及电源电路组成。各部分电路组成框图如图4-10所示。

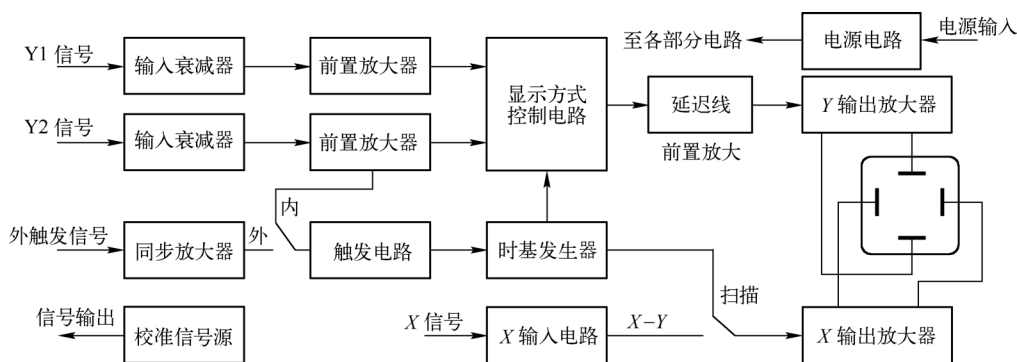


图4-10 通用电子示波器的组成框图

1. 通用电子示波器的垂直系统

通用电子示波器的垂直系统（Y通道）通常包括输入衰减器、Y放大器、显示方式控制电路、延迟线、Y输出放大器等部分。

(1) 输入衰减器

由于示波管的偏转灵敏度是基本固定的，为扩大可观测信号的幅度范围，Y通道要设置衰减器，它可使示波器的偏转灵敏度 S_y 在很大范围内调节。对衰减器的要求是输入阻抗高，同时在示波器的整个通频带内衰减的分压比均匀不变。要达到这个要求，仅用简单的电阻分压是达不到目的的。因为在下一级的输入端及引线上都存在分布电容，这个分布电容的存在，对于被测信号高频分量有严重的衰减，造成信号的高频分量失真（脉冲上升时间变慢）。为此，必须采用图4-11（a）所示的阻容补偿衰减器。

(2) Y放大器

Y放大器包括前置放大器和输出放大器。被测信号经探头检测引入示波器后，对于微弱的信号必须通过放大器放大后再加到示波器的垂直偏转板，使电子束有足够大的偏转位移。Y放大器应具有以下特性：

① Y放大器应具有稳定的放大倍数。当示波管灵敏度（ S_v ）及示波器灵敏度（ S ）一定的情况下，Y放大器的放大倍数 $K = S_v / S$ 。例如，采用 $S_v = 20V$ 的示波管，在示波器的灵敏度 $S = 20mV$ 时，则Y通道放大倍数 $K = 20V / 20mV = 1000$ 倍。当示波器灵敏度 S 在不同挡位时，对放大倍数 K 的要求也不同。

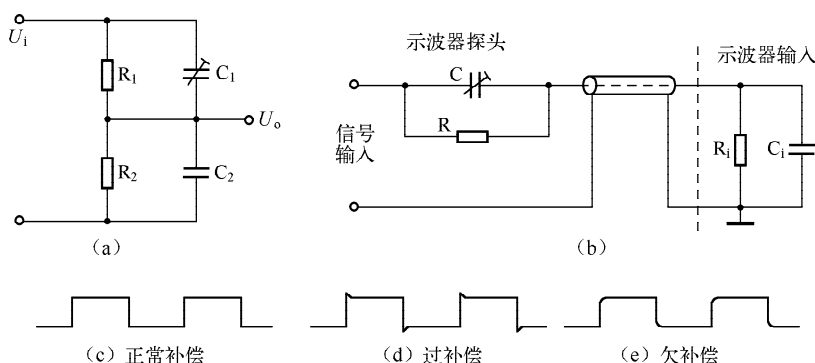


图 4-11 阻容补偿衰减器

② Y 放大器应具有足够的带宽。放大器的低频截止频率受耦合电容或射极旁路电容的限制，必须加大这些电容以降低低频截止频率或采用直接耦合。高频截止频率受两个因素限制，其一是放大器的增益随频率升高而下降，其二是分布电容 C_0 及负载电容 C_L 对高频的分流使高频增益下降。为此，要设计优良的高低频补偿电路。

③ Y 放大器应具有较大的输入阻抗。放大器应具有较大的输入电阻和较小的输入电容，一般输入电阻在 $1\text{M}\Omega$ 以上，输入电容约为几十 pF 。

④ Y 放大器的输出级采用差分电路。采用差分电路可使加在偏转板上的电压对称，差分电路还有利于提高共模抑制比，若在差分电路的输入端设置不同的直流电位，差分输出电路的两个输出端直流电位也会改变，进而改变波形在 Y 方向的位置，这个调节直流电位的旋钮称为“ Y 轴位移”旋钮。

⑤ Y 放大器设置有增益倍率开关。增益倍率开关是通过改变负反馈，使放大器的放大倍数按 5 或 10 的倍率扩大，以利于观测微弱信号或看清波形局部的细节。

⑥ Y 放大器设置有增益调整旋钮。可使放大器增益连续改变，此旋钮右旋到极限位置时，示波器灵敏度为“校准”状态。在校准状态放大倍数 K 是一个确定值。此时，可用面板上的灵敏度标注值读测信号幅度。

(3) 延迟线

在触发扫描状态，只有当被观察的信号到来时扫描发生器才工作，也就是说开始扫描需要一定的电平，因此扫描开始时间总是滞后于被测脉冲起点，其结果会使脉冲信号的上升过程无法完整地显示出来。延迟线的作用就是把加到垂直偏转板的被测信号延迟一段时间，使信号出现的时间滞后于扫描开始时间，这样就能够保证在屏幕上可观察到包括上升时间在内的脉冲全过程。对延迟线的要求是，它只起延迟时间的作用，而脉冲通过它时不能产生失真。延迟线的延迟时间通常在 $50 \sim 200\text{ns}$ 之间。

(4) 显示方式控制电路

双踪示波器使用单束示波管来显示两个波形，通常有“ $Y1$ ”、“ $Y2$ ”、“交替”、“断续”、“ $Y1 \pm Y2$ ”五种显示方式，工作状态的切换由显示方式转换开关控制。显示方式控制电路由方式转换、门电路、电子开关及混合放大电路组成，如图 4-12 所示。

① “ $Y1$ ”显示方式 在“ $Y1$ ”方式下，电子开关使 $Y1$ 门打开， $Y1$ 信号可以通过， $Y2$ 门关闭， $Y2$ 信号不能通过，只显示 $Y1$ 信号。

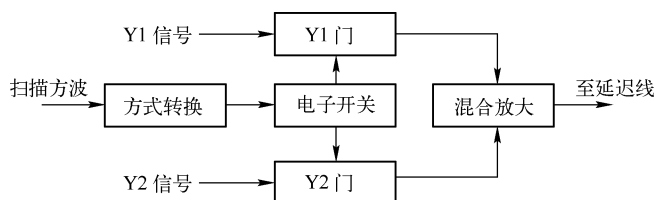


图 4-12 显示方式控制电路

② “Y2”显示方式 在“Y2”方式下，电子开关使 Y2 门打开，Y2 信号可以通过，Y1 门关闭，Y1 信号不能通过，只显示 Y2 信号。

③ “交替”显示方式 在“交替”方式下，电子开关工作在双稳状态。在扫描方波的控制下，交替打开 Y1 门和 Y2 门，这样就形成一个扫描周期显示 Y1 信号、另一个扫描周期显示 Y2 信号，故称为“交替”工作方式。

④ “断续”显示方式 在“断续”方式下，电子开关工作在自激状态，不受扫描方波控制，为固定频率（通常为 200kHz），在一个扫描周期内，Y1、Y2 信号以 200kHz 的频率轮流通过 Y1 门和 Y2 门进行显示。信号的一个周期通常由许多点组成，故称为“断续”工作方式。

⑤ “Y1 ± Y2”显示方式 在“Y1 ± Y2”方式下，Y1 门和 Y2 门均打开，Y1、Y2 信号都可通过，并经混合放大电路叠加后输出并显示。当 Y2 为正极性时，显示波形为 $Y1 + Y2$ ；当 Y2 为负极性时，显示波形为 $Y1 - Y2$ 。利用此工作方式，可以实现两路模拟信号的加或减运算。

2. 通用电子示波器的水平系统

通用电子示波器的水平系统（X 通道）主要由触发电路、时基发生器和 X 放大器组成。其中触发电路和时基发生器用来产生时基扫描信号，X 放大器用来放大扫描信号。

（1）触发控制电路

触发控制电路用来产生扫描门需要的触发脉冲，触发脉冲的幅度和波形均应达到一定的要求。触发控制电路如图 4-13 所示。

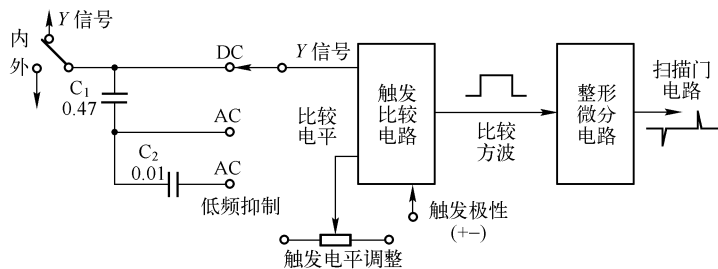


图 4-13 触发控制电路

① 触发脉冲的产生 在触发电路中，由触发比较电路把触发信号加以整形，产生达到一定要求的触发脉冲。触发比较电路采用双端输入的电压比较器，其中一个输入端接被测信号，另一个输入端接一个可调的直流电压（触发电平），在比较点上电路状态发生突变，形成比较方波，此方波经微分整形电路产生触发脉冲送扫描门电路，由负脉冲触发扫描。



② 触发极性与触发电平调整 触发极性为“+”时,比较方波下降沿对应 Y 信号的上升过程,由下降沿对应的负脉冲启动扫描,所以扫描起点也就对应了信号的上升过程。触发极性为“-”时,比较方波下降沿对应 Y 信号的下降过程,扫描起点也就对应了信号的下降过程。调整“触发电平”电位器,可以改变比较点,将扫描起点调整到一个确定的相位上。

③ 触发耦合方式控制 耦合方式控制开关为触发信号提供了不同的接入方式。若触发信号中含有直流或缓慢变化的交流分量,应使用直流耦合(DC)方式;若采用交流信号触发,则使用交流耦合(AC)方式,这时电容 C_1 起隔直作用;AC低频抑制方式利用 C_1 、 C_2 串联后的电容,抑制信号中大约2kHz以下的低频成分,主要是滤除信号中的低频干扰。

(2) 时基发生器

时基发生器由扫描门、积分器、比较释抑电路组成,如图4-14所示。

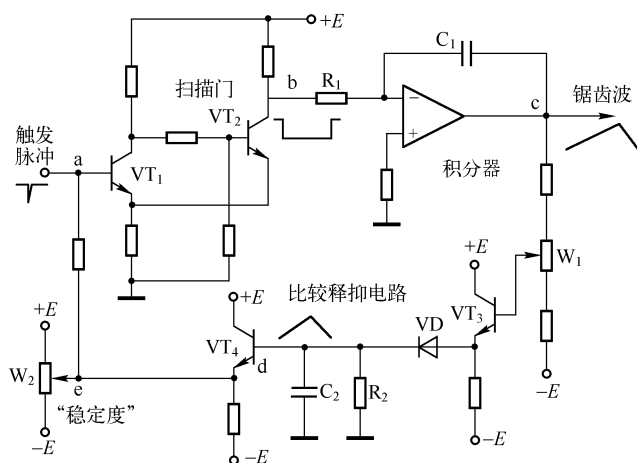


图 4-14 时基发生器电路

① 扫描门 扫描门又称时基闸门,用来产生扫描控制方波。示波器有连续扫描和触发扫描两种工作状态。在连续扫描状态,扫描门处于自激双稳状态,即使没有触发信号,扫描门也有扫描控制方波输出。在触发扫描状态,只有在触发脉冲作用下才能产生扫描控制方波。不论是连续扫描还是触发扫描,扫描锯齿波都应与被测信号同步。

扫描门由 VT_1 、 VT_2 组成,它是一种射极耦合的双稳触发电路,扫描门输入端接有来自三个方面的信号。首先由一个称为“稳定性”旋钮的电位器提供它一个直流电位 E_0 ,此外还接有从触发电路来的触发脉冲和由释抑电路来的释抑信号,由三个信号共同决定扫描门的工作状态。该电路的最大特点是具有滞后特性,滞后电平可达10V。触发扫描时,其直流电位 E_0 处于上下触发电平中间,扫描门处于 VT_1 导通 VT_2 截止的第一稳态,在负触发脉冲的作用下,翻转到 VT_1 截止 VT_2 导通的第二稳态。

② 积分器 积分器由运算放大器、积分电容 C_1 和积分电阻 R_1 组成。它在扫描门输出电压的控制下产生线性锯齿波电压。

③ 比较释抑电路 在图4-14中,由 VT_3 、 VT_4 、 C_2 、 R_2 组成比较释抑电路,它把积分器输出的锯齿波电压经延迟后回送给扫描门 VT_1 基极,与扫描门、积分器共同构成一个闭合



的扫描发生器环路。在扫描过程中,积分器输出的锯齿波电压经 W_1 加到 VT_3 基极,经 VD 后对 C_2 充电, C_2 电压通过 VT_4 加到 VT_1 基极, VT_1 基极电压在 E_0 基础上上升,当升至上触发电平时,扫描门重新回到 VT_1 导通 VT_2 截止的第一稳态。此后,进入恢复期,积分电容放电, C_1 电压恢复到起始状态,与此同时,释抑电容 C_2 通过释抑电阻 R_2 放电, VT_1 基极电位恢复到 E_0 ,在下一个触发脉冲到来时,使扫描门又翻转到 VT_1 截止 VT_2 导通的第二稳态。在连续扫描状态时,直流电位 E_0 始终处于下触发电平以下,释抑电容 C_2 放电结束, VT_1 基极电位恢复到 E_0 后,扫描门自动翻转到 VT_1 截止 VT_2 导通的第二稳态。

(3) X 输出放大器

X 输出放大器与 Y 输出放大器类似,也是一个双端输出的差分放大器,改变 X 放大器的增益可以使光迹在水平方向得到若干倍扩展,或对扫描速度进行微调,以校准扫描速度。改变 X 放大器的输入直流电位,差分放大器的两个输出端直流电位也会改变,进而改变扫描线在 X 方向的位置,这个调节直流电位的旋钮称为“X 位移”旋钮。

知识 3.2 通用电子示波器的性能指标

通用电子示波器的型号很多,但基本功能和使用方法相似,下面以 MOS-620 型通用示波器为例,说明通用示波器性能指标及面板标示。该示波器的外形如图 4-15 所示。



图 4-15 MOS-620 型双踪示波器外形图

1. MOS-620 型示波器的主要性能指标

(1) 垂直系统

- ① 频率响应 DC ~ 20MHz (-3dB);
- ② 上升时间 $\leq 17.5\text{ns}$;
- ③ 灵敏度 5mV/格 ~ 5V/格,按 1-2-5 步进分 10 挡,误差 $\leq \pm 3\%$;
- ④ 输入阻抗 电阻 $1\text{M}\Omega \pm 3\%$, 电容 $25\text{pF} \pm 3\text{pF}$;



⑤ 最大允许输入电压 300V (探头×1), 600V (探头×10);

⑥ 工作方式 CH1、CH2、DUAL (双踪)、ADD (相加)。

(2) 水平系统

① 扫描方式 自动扫描, 触发扫描;

② 时间因数 $0.2\mu\text{s}/\text{格} \sim 0.5\text{s}/\text{格}$, 按 1-2-5 步进分 20 挡, 误差 $\leq \pm 5\%$, 可扩展 $\times 10$ 。

(3) 触发系统

① 触发源 CH1、CH2、LINE、外触发;

② 触发极性 正极性、负极性;

③ 触发方式 AUTO、NORM、TV-V、TV-H。

(4) X-Y 工作方式

① CH1 驱动 Y 轴, CH2 驱动 X 轴;

② 频带宽度 $0 \sim 500\text{kHz}$;

③ 灵敏度 同垂直系统。

(5) 校准信号源

① 输出信号 方波 1kHz 、 $2V_{P-P} \pm 2\%$;

② 输出阻抗 $1k\Omega$ 。

2. MOS-620 型示波器的面板

MOS-620 型示波器的面板标示如图 4-16 所示, 按操作功能可分为显示部分、垂直通道、水平通道三大部分, 各部分开关、旋钮的功能说明如下。

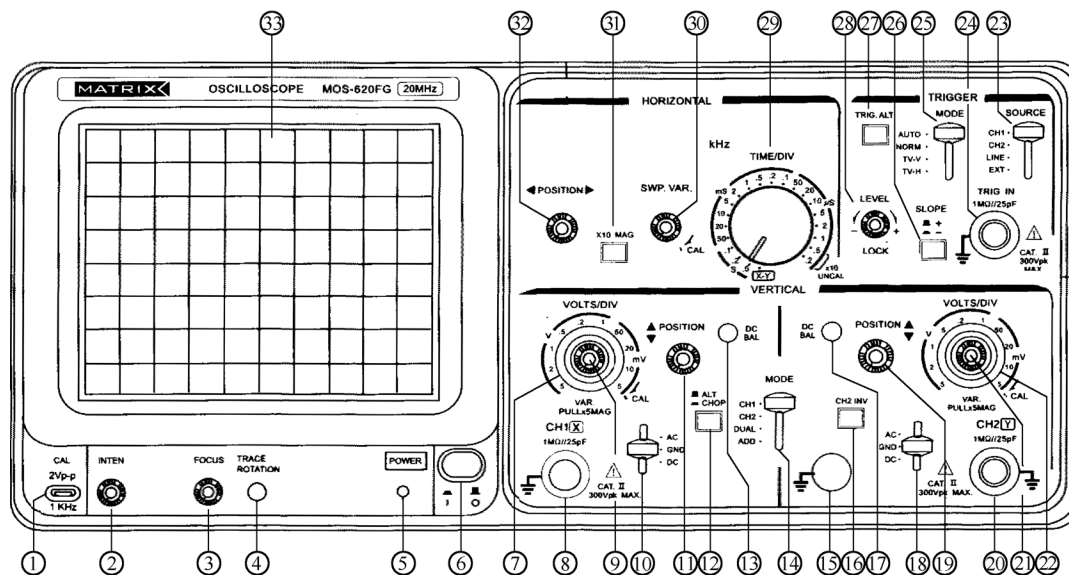


图 4-16 MOS-620 型双踪示波器面板标示图

(1) 显示部分

① 校准信号 CAL 由此输出 1kHz 、 $2V_{P-P}$ 的方波校准信号;



- ② 亮度调节 INTEN 用于调节扫描线亮度;
- ③ 聚焦调节 FOCUS 用于调节扫描光点聚焦;
- ④ 轨迹旋转 用于调节水平轨迹与刻度线的平行;
- ⑤ 电源指示灯 打开电源, 指示灯亮;
- ⑥ 电源开关 POWER 按下打开电源;
- ③ 示波管屏幕。

(2) 垂直通道

- ⑦、② 灵敏度选择 VOLTS/DIV 用于选择垂直灵敏度, $5\text{mV/格} \sim 5\text{V/格}$, 分 10 挡;
- ⑧ 信号输入插口 CH1 (X) CH1 输入插口, 在 $X-Y$ 模式下, 作为 X 轴输入端;
- ⑨、② 灵敏度微调 用于灵敏度连续调节, 顺时针旋转到底为校正位置, 灵敏度被校正为标示值。该旋钮拉出为灵敏度 $\times 5$;
- ⑩、⑬ 耦合方式 AC - GND - DC 用于选择垂直输入信号的耦合方式;
- ⑪、⑱ 垂直位移调节 POSITION 用于调节轨迹在屏幕上的垂直位置;
- ⑫ 交替/断续转换 ALT/CHOP 弹开为交替显示, 按下为断续显示;
- ⑬、⑰ 直流平衡 DC BAL 用于调节直流平衡。输入耦合开关设定为 GND, 触发方式为自动时, 可将光迹调到中间位置;
- ⑭ 垂直方式选择 MODE 用于选择垂直工作方式;
- ⑮ 接地端 用于仪器接地;
- ⑯ 极性反转 CH2 INV 用于 CH2 信号的极性反转, 实现 CH1 - CH2 运算;
- ⑳ 信号输入插口 CH2 (Y) CH2 输入插口, 在 $X-Y$ 模式下, 作为 Y 轴输入端;

(3) 水平通道

- ㉓ 触发源选择 SOURCE 用于选择内、外触发信号。当垂直方式选择在 DUAL 或 ADD 状态时, CH1: 选择 CH1 为内部触发信号源; CH2: 选择 CH2 作为内部触发信号源; LINE: 选择交流电源作为内部触发信号源。EXT: 选择外部信号作为触发信号源;
- ㉔ 外触发输入插口 TRIG IN 当选择外触发时, 外触发信号由此插口输入;
- ㉕ 触发方式选择开关 用于选择触发方式 AUTO: 自动为连续扫描, NORM: 常态为触发扫描, TV - V: 电视场触发, TV - H: 电视行触发;
- ㉖ 触发极性选择 SLOPE 用于选择触发极性, 弹开为 “+”, 按下为 “-”;
- ㉗ 触发源交替 TRIG. ALT 按下时交替选择 CH1 和 CH2 为内触发信号源;
- ㉘ 触发电平调节 LEVEL 用于调节触发电平, 当顺时针方向转到底并关闭开关后, 触发电平被锁定, 这时改变扫描速度或信号幅度时, 不再需要调节触发电平即可获得同步;
- ㉙ 时间因数选择 TIME/DIV 用于选择时间因数 (扫描速度), $0.2\mu\text{s/格} \sim 0.5\text{s/格}$, 分 20 挡, 按 1 - 2 - 5 步进;
- ㉚ 时间因数微调 用于时间因数连续调节。顺时针旋转到底为校正位置, 时间因数被校正为标示值;
- ㉛ 扫描扩展 $\times 10\text{MAG}$ 按下时扫描速度扩展 10 倍;
- ㉜ 水平位移调节 POSITION 用于调节轨迹在屏幕上的水平位置。

知识 3.3 通用电子示波器的应用

下面对照图 4-16 所示 MOS-620 型示波器面板, 说明示波器的应用及操作使用方法。

(1) 电压测量

① 电压定量测量

将灵敏度微调旋钮右旋到底至校准位置。电压测量值用下式计算。

$$U_{pp} = D_y h \quad (4-3)$$

式中 U_{pp} ——被测电压峰-峰或任意两点间电压值, 单位为 V;

D_y ——偏转灵敏度, 单位为 V/格;

h ——被测电压波形峰-峰高度或任意两点间高度, 单位为格。

② 直流电压测量

置“扫描方式”开关于“**AUTO**”, 选择扫描速度使扫描不发生闪烁现象。

置“交流—地—直流”开关于**GND**。调节垂直“位移”使该扫描线准确地落在水平刻度线上, 以便于读取信号电压。

置“交流—地—直流”开关于**DC**, 并将被测电压加至输入端。扫描线的垂直位移即为直流电压幅度。如果扫描线上移, 被测电压相对于地电位为正。如果扫描线下移, 该电压为负。电压值可用式(4-3)求出。

例如, 将探头衰减比置于 $\times 10$, 垂直偏转灵敏度 V/格置于“**0.5V/格**”, “微调”旋钮置于校准位置, 所测得的扫描线偏高 5 格, 根据公式, 被测电压为 $0.5\text{V/格} \times 5 \text{格} \times 10 = 25\text{V}$ 。

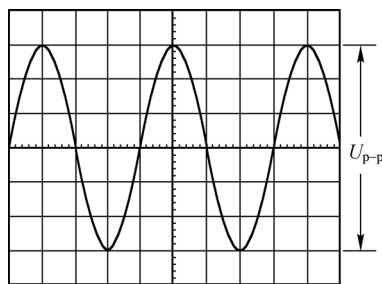


图 4-17 交流电压测量波形

③ 交流电压测量

当测量叠加在直流电上的交流波形时, 将“交流—地—直流”开关置于**DC**时就可测出包括直流分量的值。如仅测量交流分量, 则将该开关置于**AC**。当测量叠加在直流电上的交流波形时, 将“交流—地—直流”开关置于“**DC**”就可测出包括直流分量的值。如仅测量交流分量, 则将该开关置于“**AC**”。按这种方法测得的值为峰—峰值 (U_{p-p}), 如图 4-17 所示。

正弦波信号的有效值 (U_{rms}) 可用下式求出:

$$U_{rms} = U_{p-p} / 2\sqrt{2} \quad (4-4)$$

例如将探头衰减比置于“ $\times 1$ ”, 垂直偏转因数置于“**5V/格**”, “微调”旋钮置于校准位置, 并将“交流—地—直流”开关置于“**AC**”, 若所测得波形的峰—峰值为 6 格, 则峰—峰值电压为

$$U_{p-p} = 5\text{V/格} \times 6 \text{格} = 30\text{V}$$

有效值电压为

$$U_{rms} = 30\text{V} / 2\sqrt{2} = 10.6\text{V}$$

(2) 时间间隔测量

将时间因数微调旋钮右旋到底至校准位置。并确定扫描扩展开关的值, 时间间隔测量值用下式计算:

$$T = D_x l / k \quad (4-5)$$



式中 T ——被测信号波形任意两点间时间值, 单位为 s ;

D_x ——扫描时间因数, 单位为 $s/\text{格}$;

l ——被测信号波形任意两点间长度, 单位为格;

k ——扫描扩展开关的值, 扫描未扩展时为 1, 扫描扩展时为 10。

① 脉冲宽度测量 脉冲宽度基本测量方法如下:

- 调节脉冲波形的垂直位置, 使脉冲波形的顶部和底部距刻度水平中心线的距离相等, 如图 4-18 所示。
- 调整“扫描时间因数”开关, 使信号易于观测。
- 读取上升和下降沿中点间的距离, 即脉冲沿与水平刻度线相交的两点的距离。用式 (4-5) 计算脉冲宽度 τ 。

例如图 4-18 所示, 在没使用扫描扩展时, 测一脉冲电压信号, 调整“时间/格”开关, 设定在 $20\mu s/\text{格}$, 读出上升和下降沿中点间的距离为 2.5 格, 则该信号的脉冲宽度为

$$\tau = 20\mu s/\text{格} \times 2.5 \text{ 格} = 50\mu s$$

② 上升 (或下降) 时间的测量 脉冲上升 (或下降) 时间的测量方法如下:

- 调节脉冲波形的垂直与水平位置, 方法与脉冲宽度测量时相同。
- 读取上端 10% 点至下端 10% 点之间的距离, 用式 (4-5) 计算上升时间 t 。

例如在图 4-19 中, 两点间距离为 0.8 格, 则该信号的 $t = 50\mu s/\text{格} \times 0.8 \text{ 格} = 40\mu s$ 。

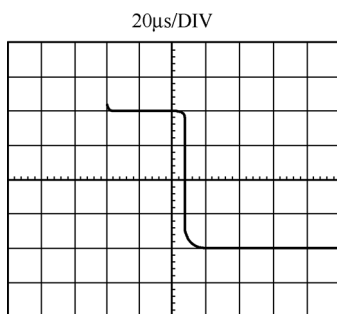


图 4-18 脉宽测量

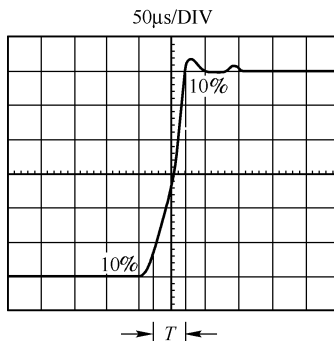


图 4-19 上升 (或下降) 时间测量

(3) 频率的测量

对于频率测量, 有下列两种方法。

- ① 可由时间公式求出输入信号一个周期的时间 $T(s)$, 然后用下式求出信号频率 $f(\text{Hz})$ 。

$$f = 1/T$$

- ② 数出有效区域中 10 格内的重复周期数 N , 然后用下式计算信号频率 $f(\text{Hz})$ 。

$$f = N/10D_x$$

当 N 很大 (30 到 50) 时, 第二种方法的精确程度比第一种方法更高。

例如示波器的扫描时间因数设定在“ $10\mu s/\text{格}$ ”的位置上, 测得的波形如图 4-20 所示, 10 格内重复周期 $N=40$, 则该信号的频率为 $f=40/(10\mu s/\text{格} \times 10 \text{ 格})=400\text{kHz}$ 。

(4) 相位的测量

对于相位的测量, 有如下两种计算方法:

- ① 调节扫描时间因数开关和微调旋钮, 使显示的波形一个周期的长度为 6 格。此时 1 格



所代表的波形相位为 60° (1 周期 = $2\pi = 360^\circ$)，两个信号之间的相位差 ϕ 可用下式计算。

$$\phi = T \times 60^\circ (\text{度})$$

式中 T —— 导前和滞后信号与水平中心线相交的两点间距离 (格)。

例如，图 4-21 所示波形的相位差 $\phi = 1.5 \text{ 格} \times 60^\circ = 90^\circ$ 。

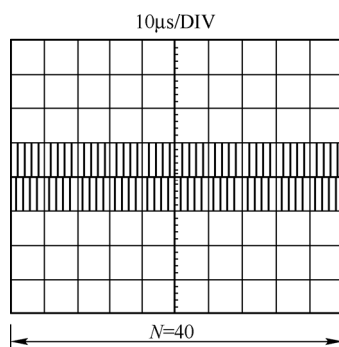


图 4-20 频率测量

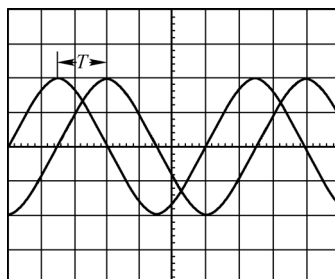


图 4-21 相位测量

② 先测量信号波形的周期和两信号对应点间的时间 T ，相位差 ϕ 可用下式计算。

$$\phi = \frac{T}{T_s} \times 360^\circ (\text{度})$$

式中 T —— 两信号与水平中心线相交的两点间距离 (格或 s)；

T_s —— 信号的周期 (格或 s)。

(5) 调幅系数的测量

调幅系数的测量方法有直线扫描法、梯形图法和椭圆法三种。下面简要介绍前两种。

① 直线扫描法 直线扫描法测量调幅系数时，将被测信号加到示波器 Y 轴输入端，调整示波器有关的开关旋钮，得到如图 4-22 所示的调幅波波形，测出 A 、 B 的长度，按下式计算调幅系数：

$$m_a = \frac{A - B}{A + B} 100\% \quad (4-6)$$

② 梯形图法 梯形图法测量调幅系数时，示波器工作于 $X-Y$ 方式，将调幅波和调制信号分别加至示波器的 X 、 Y 轴输入端，在荧光屏上显示出图 4-23 所示的梯形图，测出 A 、 B 的长度，利用式 (4-6) 计算即可。

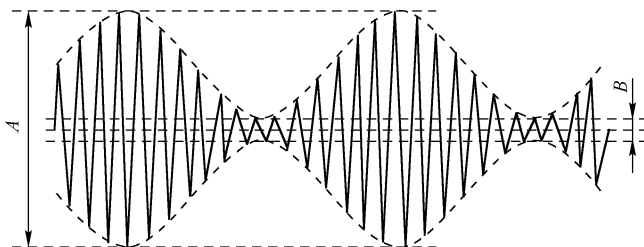


图 4-22 直线扫描法测量调幅系数

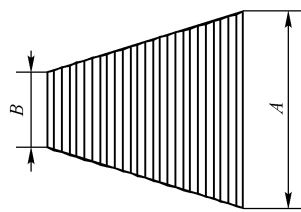


图 4-23 梯形图法测量调幅系数

1. 示波器选择使用注意事项

(1) 根据被测波形选择合适的示波器

选择示波器时要考虑其特性指标应满足对信号观测的需要，主要考虑示波器的频带宽



度,如果观测脉冲信号的示波器的频带不够宽,易造成失真。通常为了使信号的高频成分基本不衰减地显示,示波器的带宽应为被测信号中最高频率的三倍左右。

观测不同的信号对示波器有不同的要求。对于微弱信号要选择Y通道灵敏度高的示波器;当观测窄脉冲或高频信号时,除了示波器的通带要宽外,还要求有较高的扫描速度;观测缓慢变化的信号时,要求示波器能低速扫描和具有长余辉;观测两个独立的信号时可选双踪示波器;观测多路相关信号时可选多踪示波器;当需要在观测信号列的同时还要仔细观察某部分细节时,可选双扫描示波器;需要把被观测信号保留一定时间时,应选记忆存储示波器。

(2) 正确合理地使用探头

使用示波器探头时应注意下面几点。

① 必须根据测试的具体要求来选用探头类型。例如,误用电阻分压器探头去测量高频或脉冲电路,那么由于这种探头的高频响应很差,会使脉冲波形产生严重失真。

② 一般探头和示波器都应配套使用,不能互换,否则将会导致分压比误差增加或高频补偿不当。特别是低电容探头,如果示波器Y通道的输入级放大管更换而引起输入阻抗改变,或探头互换,都有可能造成高频补偿不当而产生波形失真。

③ 低电容探头的电容器应定期校正,以达到最佳补偿效果。

(3) 测试操作中应注意的几个问题

① 要充分利用示波器的“灵敏度”、“扫描速度”、“探头衰减”、“增益微调”及“倍乘”、“扩展”等开关或旋钮,使波形大小适中;要既能充分利用荧光屏的有效面积,又不因波形过大而产生失真。

② 在用到示波器的“灵敏度”和“扫描速度”开关做定量测量时,要先用标准信号对这些量程开关进行校准。在测量中,灵敏度和扫描速度“微调”旋钮应放在校正位置。“倍乘”或“扩展”开关置于“ $\times 1$ ”时,时间测量结果不需换算;若置于“ $\times 10$ ”时,则波形被扩大了10倍,其时间测量值应除以10。如果信号是经过探头衰减后接入示波器,其幅度测量值应该乘以衰减倍数。

任务4 仪器介绍——数字存储示波器

人们在使用示波器对信号波形进行测试时,常希望被观测的波形能保存一段时间,需要时再取出来重新加以显示,或与其他波形进行比较;在观测单次瞬变信号、超低频缓变信号和非周期信号时,波形的存储和记忆则显得更为重要。

知识4.1 数字存储示波器的性能特点

数字存储示波器是模拟示波器技术、数字化测量技术、计算机技术的综合产物,其内部采用了大规模集成电路和微处理器,整个仪器在控制程序的统一指挥下工作。依靠数字的存储和读出显示被测波形,因而与普通模拟示波器相比,具有以下一系列优点。

(1) 可长期存储波形

在数字存储示波器中,把需要保存的波形存放在参考波形存储器中,由后备电源供电,



因此存储内容可长期保存。还可通过写保护功能,使有关存储器只能读出不能写入,以保护重要内容不被改写。

(2) 可进行负延时触发

普通模拟示波器只能观察触发以后的信号,而数字存储示波器的触发点可位于显示波形的任何位置,即具有负延时(预延时)功能。利用负延时可观测触发点以前的信号,这是其最有力的特点之一,这一功能特别适合于观测非周期信号和缓变信号。

(3) 便于观测单次过程和突发事件

数字存储示波器只要对波形进行一次取样存储,就可以长期保存和多次显示,并且取样存储和读出显示的速度可在很大的范围内调节,因此便于捕捉和显示单次瞬变信号和突发事件。只要设置好触发源和取样速度,就能在事件发生时将其采集下来并存入存储器,这一特点在很多非电量测量中得到广泛应用。

(4) 便于数据分析和处理

由于微计算机具有数字处理和计算能力,所以数字存储示波器具有数据分析和处理功能。如对多次取样数据取平均值计算、信号电压值、时间间隔的代数运算、微积分运算等,有的还具有 FFT 运算功能。

(5) 具有多种显示方式

数字存储示波器的显示方式多样而灵活,这也是与普通模拟示波器不同之处,数字存储示波器有存储显示、抹迹显示、卷动显示、放大显示和 $X-Y$ 显示等,可适应不同情况下波形观测的需要。

(6) 可用数字显示测量结果

由于微计算机有一套成熟的字符显示功能,所以数字存储示波器可直接在屏幕上用数字形式显示测量结果,读数直观,测量准确度高。

(7) 具有多种方式输出

数字存储示波器存储的数据可在微计算机管理下通过多种接口,用各种方式输出。如 GPIB 接口输出,RS232 串口输出。

(8) 便于进行功能扩展

数字存储示波器与所有的微机化仪器一样,可以在不改动硬件的情况下,只改变工作程序(即软件)就可扩展仪器的测量功能。

知识 4.2 数字存储示波器的组成原理

1. 数字存储示波器的结构组成

数字存储示波器的组成框图如图 4-24 所示。输入的被测信号通过 A/D 变换器变成数字信号,由地址计数器选通存储器的存储地址,将该数字信号存入存储器,存储器中的信息每 256 个单元组成一页,当要显示信息时,给出页面地址,地址计数器则从该页面的 0 号单元开始,读出数字信息,送到 D/A 变换器,变换成模拟信号后,送入 Y 输出放大器,加至示波管进行显示。同时,地址信号经过 X 系统的 D/A 变换器,送入 X 输出放大器,以控制 Y 信号显示的水平位置。

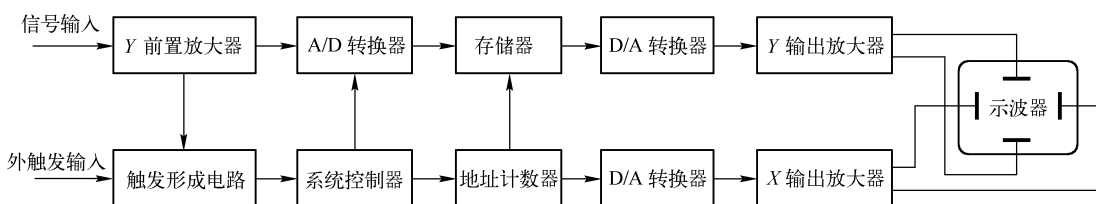


图 4-24 数字存储示波器组成框图

2. 数字存储示波器的工作原理

数字存储示波器的工作波形如图 4-25 所示。被测信号输入后，首先对模拟量进行取样，图 (a) 中的 $a_0 \sim a_7$ 点即对应于被测信号 U_y 的 8 个取样点，这种取样是“实时取样”，是对一个周期内信号的不同点进行取样，8 个取样点得到的数字量分别存储于地址为 00 开始的 8 个存储单元中，地址号为 00 ~ 07，其存储的内容为 $D_0 \sim D_7$ ，在显示时，取出 $D_0 \sim D_7$ 数据，进行 D/A 变换，同时，存储单元地址号从 00 ~ 07 也经过 D/A 变换，形成图 (d) 所示阶梯波，加到水平系统，控制扫描电压，这样就将被测波形 U_y 重现于荧光屏上，如图 (e) 所示，只要 X 方向和 Y 方向的量化程度足够精细，图 (e) 波形就能准确地代表图 (a) 的波形。

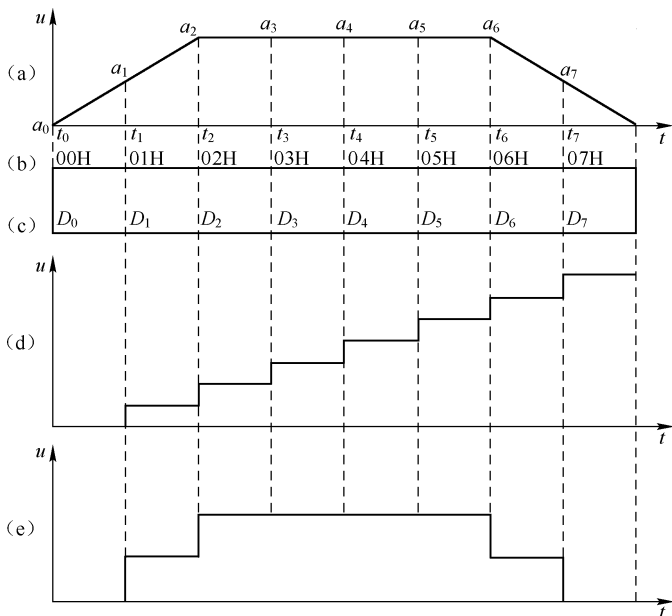


图 4-25 数字存储示波器的工作波形

知识 4.3 数字存储示波器的工作方式

1. 取样工作方式

数字存储示波器有两种取样方式，即实时取样和等效取样（非实时取样）。实时取样是在信号的一个周期内（或一段时间内）进行连续取样。而等效取样，是为了提高示波器的有效带宽而采取的方式。在此方式下取样点是在不同的周期上，每次取样时间延迟一个 Δt ，

显示一个完整波形需要 n 个周期上的取样点，这样就把频率很高的信号通过等效取样变为频率较低的信号，扩展了示波器的有效带宽。其取样过程如图 4-26 所示。

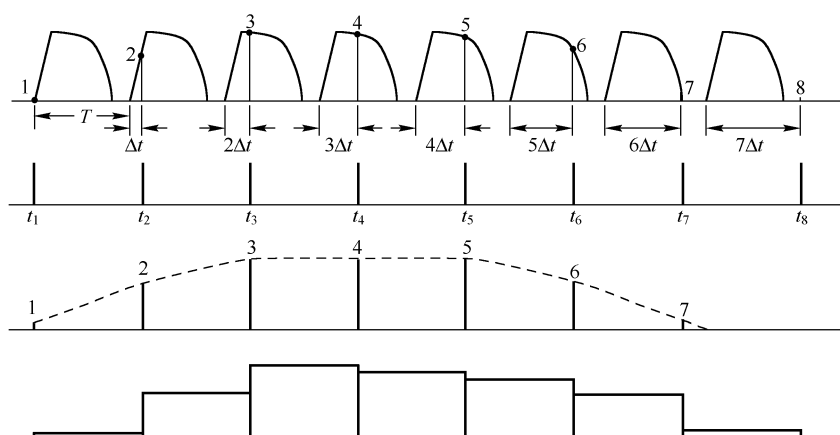


图 4-26 非实时取样波形图

2. 触发工作方式

数字存储示波器的触发方式可分为常态触发和预置触发（延时触发）。

(1) 常态触发

常态触发是在存储工作模式下自动形成的，同模拟示波器基本一样，可通过面板设置触发电平的幅度和极性，触发点可处于复现波形的任何位置，也包括存储波形的末端。触发点位置通常用加亮的光点来显示。

(2) 预置触发

预置触发是人为的设置触发点在复现波形上的位置，它是在进行预置之后，通过微处理器的控制和计算功能来实现的。由于触发点位置不同，就可以观测到触发点前后不同段落上的波形。因为数字存储示波器的触发点只是一个存储的参考点，而不一定是取样、存储的第一个点，这就给显示数据的选择带来很大的灵活性。这种触发功能对于观测单次瞬变信号和非周期信号特别有用。图 4-27 所示的就是利用数字存储示波器预置触发的负延时特性来观察振荡器的起振过程。

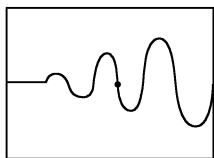


图 4-27 利用负延时特性观察振荡器起振过程

3. 测量与计算方式

数字存储示波器利用了微处理器和 A/D、D/A 等硬件所构成的测量系统，使其不但可以观测波形，还可以完成被测波形上任意两点之间的电位差、时间差测量，波形电压的平均值、峰—峰值、有效值计算，波形的周期、频率、脉宽及前后沿时间的测量，以及波形的叠加运算等。

数字存储示波器对波形参数的测量，分自动测量和光标测量。一般参数测量为自动测量，即示波器自动完成测量工作，并将测量结果以数字形式显示在示波管屏幕上。特殊值的测量可使用手动光标进行测量。



所谓光标测量,就是在示波管屏幕上设置两条水平光标线和两条垂直光标线,这四条光标线可在面板按键的控制下移动,光标与波形的交点对应于信号存储器中的相应数据。测量时,示波器在测量程序控制下,根据光标位置来完成测量计算工作,并将测量结果以数字形式显示在示波管屏幕上。

4. 面板键操作方式

数字存储示波器的面板操作键分两种,立即执行键和菜单键。按下立即执行键后,示波器立即执行该项操作;当按下菜单键时,在屏幕下方(或侧面)显示一排菜单,然后按下菜单所对应的键,即执行菜单项目的操作,如图4-28所示。

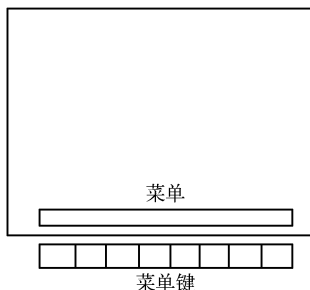


图4-28 菜单键示意图

5. 显示工作方式

数字存储示波器利用内部微计算机的控制功能和不同的存储方法,可实现多种灵活的波形显示方式,以适应不同波形的观测需要。而且在示波管显示波形的同时,还可显示相应的工作状态信息和测量数据。数字存储示波器通常有以下几种显示方式。

(1) 存储显示方式

存储显示是数字存储示波器的基本显示方式,它适合于一般信号的观测。在一次触发形成并完成信号数据的存储之后,经过显示前的缓冲存储,并控制缓冲存储器的地址顺序,依次将欲显示的数据读出,进行D/A转换后,将其稳定地显示在示波管上。这样显示的波形是由一次触发捕捉到的信号片段,在这种方式下满足一次触发条件,屏幕上原来的波形就被新存储的波形更新一次。

(2) 抹迹显示方式

抹迹显示方式适合于观测一长串波形中在一定条件下才会发生的瞬态信号。在该方式下,应先按照预期的瞬态信号设置触发电平和极性。观测开始后仪器工作在末端触发和预置触发相结合的方式下,当信号数据存储器被装满但瞬态信号未出现时,实现末端触发,在屏幕上显示一个画面,保持一段时间后,被新存入的数据更新。若瞬态信号仍未出现,再利用末端触发显示一个画面,这样一个画面一个画面地显示下去,像为了查找某个内容一页一页地翻书一样。一旦预期的瞬态信号出现,则立即实现预置触发,将捕捉到的瞬态信号波形稳定地显示在屏幕上,并存入参考波形存储器中。

(3) 卷动显示方式

卷动显示方式特别适合观测缓变信号中随机出现的突发信号,它又包括两种形式。

一种是用新的波形逐渐代替旧的波形,变化点自左向右移动,如图4-29(a)所示。另一种是波形从屏幕的右端推出向左移动,在左端消失。如图4-29(b)所示。当异常波形出现时,可按下存储键,将此波形存入参考波形存储器,以便作更细致的观测和分析。

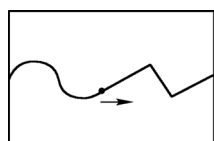
当设定为该方式时,信号存储器在装满之后,将不停地移动所有数据,推出旧数据,存入新数据,并不断地把新数据送入显示缓冲存储器,加以适当的延迟后读出显示。

(4) 放大显示方式

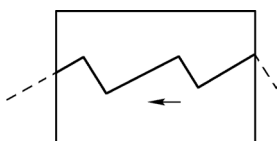
放大显示方式适合于观测信号波形的细节,此显示方式是利用延迟扫描方法实现的,如



图 4-30 所示。此时屏幕一分为二，上半部显示原波形，下半部显示放大的部分，其放大位置可用光标控制，放大比例也可以调节，还可以用光标测量细节部分的参数。



(a)



(b)

图 4-29 数字存储示波器的卷动显示方式

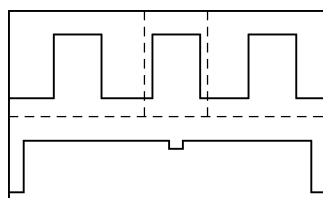


图 4-30 数字存储示波器的放大显示方式

(5) X-Y 显示方式

X-Y 显示方式和通用示波器的显示方法基本相同，可用于显示两个信号之间的关系，如李沙育图形。

任务 5 应用实训——通用电子示波器使用实训

实训 5.1 信号参数测量实训

1. 实训目的

- (1) 学会通用电子示波器的操作使用方法；
- (2) 掌握电路和信号参数的基本测量技能。

2. 实训设备

通用电子示波器、函数信号发生器。

3. 实训内容

(1) 不同波形信号参数测量实训

用函数信号发生器分别产生 3 种不同波形，6 种不同频率的信号，具体要求由实训老师给出。用示波器测量波形信号的基本参数，将测量与计算数据填入表 4-1 中。

表 4-1 波形信号基本参数的测量与计算数据

波 形 信 号	频 率 (Hz)	周 期 (μs)	$U_{\text{P-P}}$ (V)	U_{P} (V)	U_{rms} (V)
正弦波 f_1					
正弦波 f_2					
方波 f_3					
方波 f_4					
三角波 f_5					
三角波 f_6					



(2) 脉冲信号参数测量实训

用函数信号发生器分别产生2种不同周期 T 、3种不同脉宽 τ 的信号，具体要求由实训老师给出。用示波器测量脉冲信号的参数，将测量计算数据填入表4-2中。

表4-2 脉冲信号参数的测量与计算数据

脉冲信号	脉冲周期 (μs)	脉冲宽度 (μs)	脉冲间隔 (μs)	上升时间 (μs)	下降时间 (μs)
脉冲 $T_1\tau_1$					
脉冲 $T_1\tau_2$					
脉冲 $T_1\tau_3$					
脉冲 $T_2\tau_1$					
脉冲 $T_2\tau_2$					
脉冲 $T_2\tau_3$					

实训5.2 低频放大器性能测试实训

1. 实训目的

- (1) 学会通用电子示波器的操作使用方法；
- (2) 掌握低频放大器的频率特性测试技能。

2. 实训设备

通用双踪示波器、低频信号发生器、低频交流放大器、直流稳压电源。

3. 实训内容

测试低频放大器的增益—频率特性和相位—频率特性，测量连接电路如图4-31所示。用低频信号发生器产生5mV的正弦信号，加入低频放大器的输入端，保持信号的幅度不变，改变信号频率，用示波器测量频率变化时，放大器增益 A_u 的变化以及输入和输出信号间相位差 ϕ 的变化，将测试计算数据填入表4-3中。为减少使用仪器，电压测量均采用示波器测量信号电压的峰值。

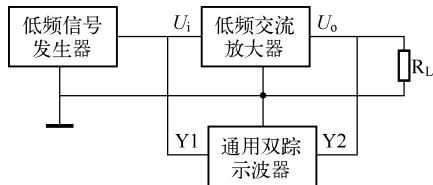


图4-31 测量连接电路

表4-3 幅频特性和相频特性测试计算数据

f (Hz)	5	10	50	100	500	1k	5k	10k	50k	100k
U_o (V)										
A_u										
ϕ ($^\circ$)										

在图4-32中画出幅频特性和相频特性曲线，找出上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L 以及相位差 $\phi = -45^\circ$ 时所对应的频率 f_0 。

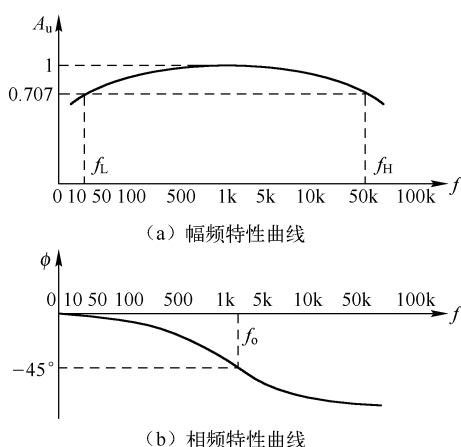


图 4-32 低频放大器频率特性曲线

实训 5.3 调幅与检波电路性能测试实训

1. 实训目的

- (1) 学会通用电子示波器的操作使用方法；
- (2) 掌握调幅与检波电路的性能测试技能。

2. 实训设备

通用双踪示波器、高频信号发生器、低频信号发生器、振幅调制器、同步检波器。

3. 实训内容

用电子示波器测试调幅与检波电路的性能，测量电路连接如图 4-33 所示。

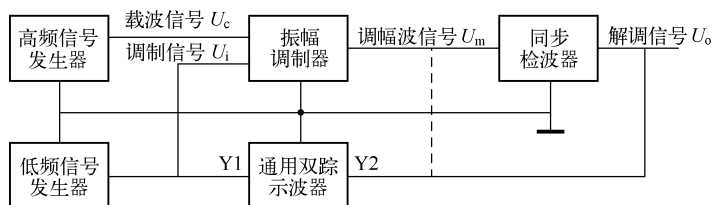


图 4-33 测试连接电路

用高频信号发生器产生 500kHz 两种不同幅度的载波信号 U_c ，用低频信号发生器产生 1kHz 两种不同幅度的调制信号 U_i ，分别接至振幅调制器的输入端；先用双踪示波器测量输入的调制信号 U_i 和振幅调制器输出的调幅波信号 U_m ，在图 4-34 中画出调幅波的波形，并计算调幅系数 M 。然后在检波器输出端测量解调后的信号 U_o ，并与调制信号 U_i 的波形进行比较，将测量和计算数据填入表 4-4 中。为减少使用仪器，电压测量均采用示波器测量信号电压的峰值。



表 4-4 不同调幅波的测量计算数据

调幅波序号	载波信号电压 U_c (V)	调制信号电压 U_i (V)	调幅系数 M (%)	解调信号电压 U_o (V)	调制与解调 信号比较结果
1					
2					
3					
4					

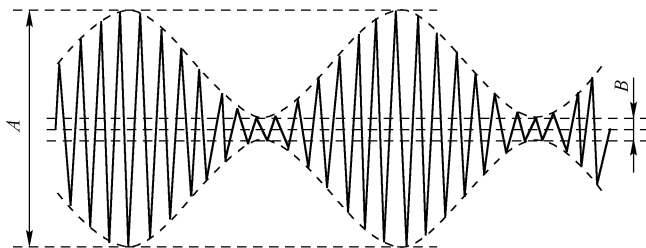


图 4-34 调幅波的波形

本项目小结

1. 示波管是示波器的主要部件, 示波管由电子枪、偏转系统和荧光屏三部分组成。示波器的扫描方式可分为连续扫描和触发扫描。连续扫描用于观测一般周期信号, 触发扫描用于观测窄脉冲信号。

2. 根据目前示波器的发展状况, 可将示波器分为模拟示波器和数字示波器两大类。其中又分为通用示波器、多束示波器、取样示波器、记忆示波器、数字存储示波器以及特种示波器等。

3. 示波器可以观测电信号随时间变化的波形, 通过屏幕显示能直接测量信号电压幅度、频率和周期、时间间隔和相位差以及调幅系数等参数, 还可以测量脉冲信号的上升时间、下降时间、脉冲宽度、上冲和下冲等参数。

4. 通用示波器由垂直系统 (Y 通道)、水平系统 (X 通道)、示波管、校准信号及电源组成。 Y 通道由探头、输入电路、延迟线和 Y 放大器组成。 X 通道由触发电路、时基发生器和水平放大器组成。

5. 通用电子示波器是使用量最多的示波器, 通常有两个输入通道, 构成双踪示波器。通用双踪示波器通常有“ $Y1$ ”、“ $Y2$ ”、“交替”、“断续”、“ $Y1 \pm Y2$ ”五种显示方式, 工作状态的切换由显示方式转换开关控制。

6. 数字存储示波器是采用数字存储技术构成的数字示波器, 它将被测模拟信号经 A/D 转换进行数字化后写入存储器中, 需要读出时, 再经 D/A 转换还原为原来的模拟信号波形, 然后在示波管上显示出来。



项目 4 思考题

1. 电子示波器的基本性能是什么？电子示波器具有哪些特点？
2. 电子示波器主要有哪几种类？其主要性能指标有哪些？
3. 阴极射线示波管由哪几部分组成？各部分功能是什么？
4. 示波管的电子枪由哪些电极构成？各电极的作用是什么？
5. 简述示波器的波形显示原理。
6. 通用电子示波器主要由哪几部分组成？各部分功能是什么？
7. 时基发生器由哪几部分组成？各部分电路的作用是什么？
8. 什么是连续扫描和触发扫描？如何选择扫描方式？
9. 通用双踪示波器的显示方式有哪些？各适用在什么场合？
10. 电子示波器主要应用在哪些方面？其测量功能主要有哪些？
11. 数字存储示波器有哪些特点？简述其工作过程。



项目5 电子计数器及应用



本项目任务目标

1. 学习电子计数器的基本知识：应了解频率和时间的测量方法，了解电子计数器的分类、特点、基本工作原理和其发展趋势；
2. 学习通用电子计数器相关知识：应了解通用电子计数器的组成、基本测量功能，掌握通用电子计数器的使用方法；
3. 学习电子计数器测量误差知识：应了解通用电子计数器的误差来源、频率测量误差、周期和时间测量误差及中界频率的确定。
4. 学习等精度计数器的相关知识：应了解等精度电子计数器的性能特点和工作原理，掌握等精度电子计数器的使用；
5. 进行通用计数器的应用实训：通过训练了解电子计数器的基本测量功能，掌握信号参数测量和电视机扫描电路测试的基本技能。

任务1 知识引领——电子计数器基本知识

频率和时间是电子技术领域内两个重要的基本参量，其他许多电参量的测量方案和测量结果都与频率有着十分密切的关系，因此频率和时间的测量相当重要。

知识 1.1 频率与时间的测量方法

信号的频率是指周期信号在单位时间内的变化次数，用 f 表示，单位是赫兹（Hz）。周期是指信号重复变化一次所需要的最小时间，用 T 表示，单位是秒（s），两者之间的关系为 $f=1/T$ 或 $T=1/f$ ，即两者互为倒数，测得其中一个量就可以换算出另一个量。

实际应用中的频率测量方法有多种，按照测量原理可分为无源测频法、外差测频法、示波测频法和电子计数器法等，前三种属于模拟测频法，而最后一种属于数字测频法。

(1) 无源测频法

无源测频法又称为谐振法，它是利用LC回路的谐振特性进行测频，如谐振式频率表，可测无源LC回路的固有谐振频率，测频范围为0.5 ~ 1500MHz。



(2) 外差测频法

外差测频法又称为比较法，它是将被测信号与标准频率信号进行混频，取其差频，当差频为零时可由标准频率读取被测信号频率。这种外差式频率计可测量高达 3000MHz 的微弱信号频率，测频精确度可达 10^{-6} 。

(3) 示波测频法

示波测频法是在示波器上根据信号波形的周期或一定时间内的波形个数来计算频率，也可以利用李沙育图形和标准信号发生器进行比较测频。示波器的测频范围可从音频到高频信号，其测量精度较低。

(4) 电子计数器法

电子计数器法是直接计数单位时间内被测信号的脉冲数，以数字形式显示其频率值。用这种方法测量信号的频率、周期和时间等参数，具有测量精确度高，测量范围宽，测量速度快，便于实现测量过程的自动化等一系列优点，因此它已成为目前测量频率、周期和时间等参数的主要方法。若配以适当的传感器，还可以进行多种非电量的测量。

知识 1.2 电子计数器的分类

电子计数器的类型很多，按照其测量功能的不同，电子计数器通常可分为以下几类。

(1) 通用电子计数器

通用电子计数器是指多功能的电子计数器，它一般具有测量频率、频率比、周期、时间间隔、累加计数和计时以及自检等功能。

(2) 频率计数器

频率计数器又称数字式频率计，是指专门用于测量信号频率的电子计数器，它通常只具有频率测量和计数功能，频率范围较宽。

(3) 智能型计数器

智能型计数器是指带有微处理器的电子计数器。它除了测量功能以外，还具有数据运算功能，配有通信接口，可与计算机或其他仪器连接实现自动化测量。

(4) 特种计数器

特种计数器是指具有特殊功能的电子计数器。如可逆计数器、程序计数器、预置计数器等，特种计数器主要用于工业生产自动化测量与控制装置中。

随着数字化测量技术和微计算机技术的发展，目前生产的许多新型电子计数器都使用了微处理器，而成为智能化仪器，具有多种自动测量和计算功能，操作使用简便，测量准确度高，测量范围宽，直接测频上限可达到 1GHz 以上，并能在整个测量范围内达到同等测量精度，这就使得电子计数器的应用，扩展到了更广阔的技术领域。

知识 1.3 电子计数器的基本原理

电子计数器是利用电子计数法原理，即在一定的时间间隔内对输入信号脉冲进行累加计数，以完成各种测量，并将测量结果以数字形式显示。计数是电子计数器的基本功能，因此，尽管电子计数器的种类很多，但其基本工作原理可用图 5-1 所示的简化框图说明。

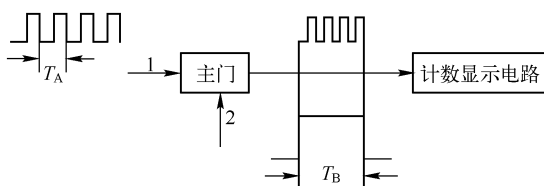


图 5-1 电子计数器简化框图

当把周期为 T_A 的脉冲信号由“1”端加入主门，把脉宽为 T_B 的门控信号由“2”端加入，若在门控信号的上升沿打开主门，计数器对输入脉冲进行累加计数，在门控信号的下降沿关闭主门，计数器停止计数，最后由显示单元以数字形式将计数值显示出来。显然计数器所计之数 N 可表示为

$$N = \frac{T_B}{T_A} = f_A T_B = \frac{f_A}{f_B} \quad (5-1)$$

可以看出若从“1”端加入不同的计数脉冲信号，从“2”端加入不同的门控信号，就能实现对频率、频率比、周期、时间间隔等多种参数的测量。

知识 1.4 电子计数器的性能指标

电子计数器的性能指标主要有以下几项。

(1) 测量功能

测量功能是表明电子计数器所具有的全部测量功能，一般包括：频率测量、频率比测量、周期测量、时间间隔测量、累加计数和计时、自校准等功能。

(2) 测量范围

测量范围是指不同测量功能的有效测量范围，一般用其上下限值表示。如：频率测量范围、周期测量范围、时间间隔测量范围、最大计数范围等。

(3) 输入特性

输入特性是指电子计数器与被测信号相关联的一组特性参数，主要包括有：

① 输入灵敏度 是指使仪器能正常工作的最小输入电压的有效值。

② 最高输入电压 是指仪器所允许输入的最大电压值，若被测信号电压超过该值，有可能会损坏仪器。

③ 输入耦合方式 仪器一般都设置有 AC 和 DC 两种耦合方式，以适应不同频率和不同波形的输入信号。AC 耦合适用于正弦波或带有直流电平的各种信号的测量，DC 耦合适用于低频脉冲或方波信号的测量。

④ 输入阻抗 输入阻抗包括输入电阻和输入电容，为了尽量减小仪器对被测信号的影响，一般都采用高输入阻抗，输入电阻大于 $1\text{M}\Omega$ ，输入电容小于 30pF 。

(4) 闸门时间和时标

闸门时间和时标是说明仪器内部标准时间信号源可提供的闸门时间信号和时标信号。通常是以 10 为系数的一系列时间基准信号。

(5) 分频倍率

分频倍率是指周期和频率比测量时对被测信号分频的倍数。对被测信号进行分频，可提

高测量分辨率，减小测量误差。分频倍率通常为 10、100、1000 等。

(6) 显示位数

显示位数是指仪器的数码显示器所具有十进制显示的总位数，显示位数越多，分辨率越高，电子计数器的显示位数通常为 6 ~ 10 位。

(7) 晶振器特性

晶振器特性是说明仪器中石英晶体振荡器的基本特性参数，包括晶体振荡频率、频率准确度和频率稳定度，它们决定着仪器的准确度和稳定性。晶体振荡器频率一般为 5MHz 或 10MHz。频率准确度和频率稳定度一般在 $\pm 10^{-6} \sim 10^{-9}$ 量级。

(8) 输出信号及特性

说明仪器可直接输出的信号类型及信号特性，输出信号有晶振信号、时标信号、闸门时间信号和测量数据，包括这些信号的输出电平和数据编码方式。

任务 2 仪器介绍——通用电子计数器

知识 2.1 通用电子计数器的结构组成

通用电子计数器的整机电路组成框图如图 5-2 所示，它一般是由输入通道、主闸门、计数电路、显示电路、时基电路、控制电路及电源电路几部分组成。

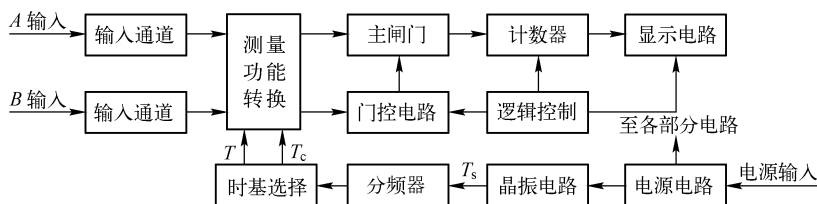


图 5-2 通用电子计数器基本组成框图

(1) 输入通道

输入通道由衰减器、放大器和整形电路组成。由于电子计数器只有在信号幅度适中时才能准确计数，因此，需对输入信号进行衰减或放大，以使信号达到一定的幅度。无论输入信号是何种波形，都要由整形电路变换成脉冲信号，然后送计数器进行计数。

(2) 主闸门

主闸门是一个双输入端逻辑与门（或是一个或门），它的一个输入端连接被测计数脉冲信号，另一个输入端连接来自门控电路的门控信号。在门控信号的控制下，允许输入的计数脉冲通过主闸门进入计数器进行计数。

(3) 计数电路

计数电路由计数器、锁存器组成。计数器在主闸门开启时间内对输入脉冲进行累加计数，并将计数结果存入锁存器，在需要显示时再送至显示电路。计数电路通常采用十进制计数器，其位数越多，测量分辨率越高。



(4) 显示电路

显示电路由译码器、驱动器和数字显示器等组成。由于计数器输出的计数值一般为BCD码(二—十进制码),需要经译码器变换成显示码,然后再通过驱动器来驱动数码显示器显示测量结果。数字显示器有多种类型,常用的有荧光管显示器、发光二极管显示器(LED)和液晶显示器(LCD)等,不同类型的数字显示器需要不同的驱动电路。

(5) 时基电路

时基电路由石英晶体振荡器、分频器或倍频器组成。其作用是产生标准时间信号。由石英晶体振荡器产生的标准频率信号(一般为10MHz),经分频或倍频后,成为以10为系数的一系列不同频率的时基信号和时标信号,由时基选择开关选取。

(6) 控制电路

控制电路包括工作方式转换电路、门控电路和逻辑控制电路。它是仪器的指挥系统,用于产生各种控制信号,控制和协调各单元电路的工作,使整机按规定的工作程序完成测量任务。主要是完成测量功能的转换、控制主闸门的开启和关闭、计数器的清零和复位、显示值的更新和保持等。

(7) 电源电路

电源电路为仪器提供所需要的各种工作电源,一般在电子计数器中,石英晶体振荡器及其恒温槽的电源和其他电路的电源是分开的,不受仪器的电源开关控制,插上插头就接通,便于在测试前先对恒温槽进行预热,以提高晶体振荡器的稳定度。

知识 2.2 通用电子计数器的测量原理

1. 频率测量

信号的频率是指周期信号在单位时间内的变化次数,测量信号的频率就是在单位时间内对被测信号脉冲进行计数,其测量原理框图如图5-3所示。

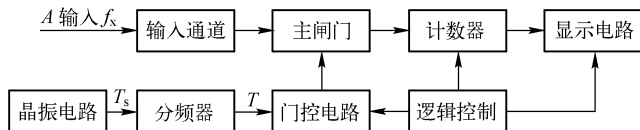


图 5-3 频率测量原理框图

测量频率时,被测信号 f_x 由 A 输入端输入,经放大、整形后转换成脉冲信号。时间基准信号由仪器内部的晶振电路产生,经分频后得到闸门控制信号,控制主闸门的开启时间。设闸门时间为 T_s ,在闸门开启时间内,输入脉冲通过主闸门,由计数器进行计数,若计数值为 N ,则被测信号的频率为

$$f_x = \frac{N}{T} = \frac{N}{kT_s} \quad (5-2)$$

式中, k 为时基分频器的分频系数。

2. 周期测量

周期是频率的倒数,测量信号的周期就是测量两个相邻脉冲的时间间隔,因此只要把测

量频率时的计数脉冲信号和时基信号的来源相互调换即可实现。其测量原理框图如图 5-4 所示。

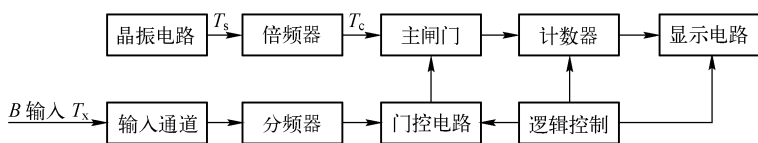


图 5-4 周期测量原理框图

测量周期时，被测信号 T_x 由 B 输入端输入，经放大、整形后转换成脉冲信号，作为闸门控制信号，控制主闸门的开启时间。由晶振信号经倍频（或分频）器产生的时标信号作为计数脉冲，若时标信号的周期为 T_c ，在被测信号周期 T_x 时间内，有 N 个时标脉冲通过主门，若计数值为 N ，则被测信号的周期为 $T_x = N \cdot T_c$ 。

为了减小测量误差，提高分辨率，通常采用多周期测量法，即先对输入信号进行 $k = 10^n$ 分频，计数器计得 10^n 个被测周期内的时标脉冲数，得到 $k \cdot T_x$ ，最后再将显示值的小数点向左移动 n 位，即可得到 T_x 的值。即

$$T_x = NT_c = \frac{NT_s}{k \cdot m} \quad (5-3)$$

式中， k 为信号分频器的分频系数， m 为时标倍频器的倍频系数。

3. 时间间隔测量

时间间隔包括同一信号任意两点间的时间差（如脉冲宽度、脉冲上升或下降时间等）和两个同频率信号之间的时间差（如两个同频脉冲串间的时间间隔、信号的相位差等）。时间间隔的测量也是测量信号的时间，因此与周期的测量原理基本相同，所不同的是测量时间间隔需要 A 、 B （或 B 、 C ）两个通道分别产生起始和停止信号去触发门控双稳电路，产生门控信号，来控制主门的开启时间，其测量原理框图如图 5-5 所示。

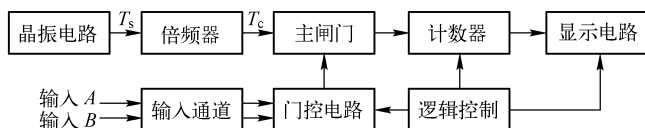


图 5-5 时间间隔测量的原理框图

为适应测量需要，在 A 、 B （或 B 、 C ）通道内分别设有极性选择开关和触发电平调节电位器，通过触发极性和触发电平的选择，可以选取输入信号的上升沿或下降沿上的某两个电平点，作为时间间隔的起点和终点。

（1）测量同一信号中的时间间隔

被测信号同时由 A 、 B 两通道输入，即可测量同一信号中任意两点间的时间间隔。

① 测量正脉冲的脉宽 τ 。将 A 通道触发极性选择为“+”，即上升沿触发， B 通道触发极性选择为“-”，即下降沿触发，调节两通道触发电平均为脉冲幅度的 50%， A 信号用来打开闸门， B 信号用来关闭闸门，时标信号 T_c 作为计数脉冲，在主闸门打开的时间内，由计数器进行计数，若计数值为 N ，则脉冲宽度为



$$\tau = NT_c = N \frac{T_s}{m} \quad (5-4)$$

式中, m 为时标倍频器的倍频系数。

② 测量脉冲的上升时间 t_r 。将两通道触发极性均选择为 “+”, 调节 A 通道的触发电平为脉冲幅度的 10%, 调节 B 通道的触发电平为脉冲幅度的 90%, 其时间间隔 t_{A-B} 就是脉冲的上升时间 t_r , (测量脉冲的下降时间, 则触发极性均选择为 “-”)。

$$t_r = t_{A-B} = NT_c = N \frac{T_s}{m} \quad (5-5)$$

(2) 测量两个信号之间的时间间隔

两个被测信号分别由 A 端和 B 端输入, 用其同一跳变沿分别产生起始脉冲和停止脉冲, 以此形成闸门控制信号, 来控制闸门的开启时间。 A 信号用来打开闸门, B 信号用来关闭闸门, 时标信号 T_c 作为计数脉冲, 在主闸门打开的时间内, 由计数器进行计数, 若计数值为 N , 则两个信号之间的时间间隔为

$$t_{A-B} = NT_c = N \frac{T_s}{m} \quad (5-6)$$

由两个同频率信号相同点之间的时间间隔可换算出两个信号之间的相位差, 设被测信号的周期为 T_x , 则两个同频率信号的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{NT_c}{T_x} \times 360^\circ \quad (5-7)$$

4. 频率比测量

频率比是指两个信号频率的比值即 f_A/f_B 。测量两个信号的频率比与频率和周期的测量原理基本相同, 其原理框图如图 5-6 所示。

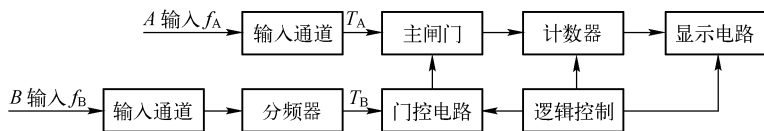


图 5-6 频率比测量原理框图

测量频率比时, 频率高的信号由 A 端输入, 频率低的信号由 B 端输入。 f_A 信号用作计数脉冲, f_B 信号用作闸门控制信号, 来控制主闸门的开启时间, 在闸门开启时间 T_B 内对 T_A 进行计数, 若计数值为 N , 此计数值就是 A 信号与 B 信号的频率比, 即 $f_A/f_B = N$ 。

为了增加显示值的有效位数, 减小测量误差, 通常是对 f_B 信号进行 10^n 分频, 从而得到 $10^n f_A/f_B$, 最后再将显示值的小数点向左移动 n 位即得到 f_A/f_B 。

5. 累加计数和计时

累加计数是电子计数器最基本的测量功能, 是指在一段时间内, 累加被测信号的脉冲个数, 测量原理框图如图 5-7 所示。

① 累加计数。计数信号 N_x 由 A 输入端输入, 经放大、整形后转换成脉冲信号。此时由控制开关控制主闸门的打开和关闭, 在主闸门打开时间内, 计数器对输入脉冲进行累加计

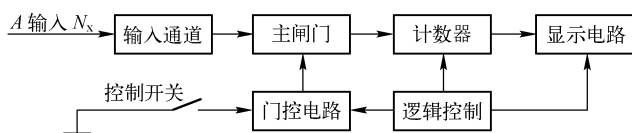


图 5-7 外控累加计数原理框图

数，此时显示的计数值 N 就是从启动到停止期间的脉冲个数，即 $N_x = N$ 。

② 计时或定时。若是对时标信号 T_c 进行计数，则计数器累计的就是主闸门的开启时间，这便实现了计时功能。若时标信号周期为 T_c ，计数值为 N ，则所计时间 $T = N \cdot T_c$ 。

电子计数器计时精确，可用于工业生产中的定时控制。由于在累加计数和计时中所选的测量时间往往较长，因而对门控的开关速度要求不高，主闸门的开、关除了由本地手控外，也可以远地遥控或程控。

6. 自校准

通常在使用电子计数器进行测量之前，要对电子计数器进行自校准，一是检验电子计数器的逻辑关系是否正常，二是检验电子计数器能否准确地进行定量测量，自校准的原理框图如图 5-8 所示。

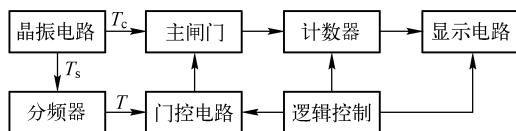


图 5-8 自校准原理框图

用机内的晶振信号作为时标信号 T_c ，再经分频形成时基信号 T ，由此可见，自校准就是利用机内时基信号 T 对机内时标信号 T_c 进行计数。在电子计数器正常工作时，时基和时标信号都是已知的，如果多次自校准均能稳定地显示 $N = 10\,000\,000$ ，则说明仪器工作正常，否则可能有问题。

知识 2.3 通用电子计数器的使用

通用电子计数器的型号很多，但使用方法基本相同。下面以常用的 E312A 型通用电子计数器为例，说明其使用方法。E312A 型通用电子计数器的外形如图 5-9 所示。

1. E312A 型通用电子计数器的电路组成

E312A 型通用电子计数器为 E312 型的更新换代产品，仪器中采用了大规模专用集成电路，与老型号的仪器相比减少了大量元器件，提高了仪器的可靠性，同时也减小了体积和重量，降低了功耗。其主机部分电路组成如图 5-10 所示。

该仪器有两个输入通道，它的计数、译码、显示驱动与逻辑控制部分由一片大规模集成电路 ICM7226B 组成，显示器采用了八位 LED 数码显示器，三路工作电源均由集成三端稳压器提供，标准信号源采用 ED441C 型 5MHz 插入式小型恒温石英晶体振荡器和二倍频电



图 5-9 E312A 型通用电子计数器外形图

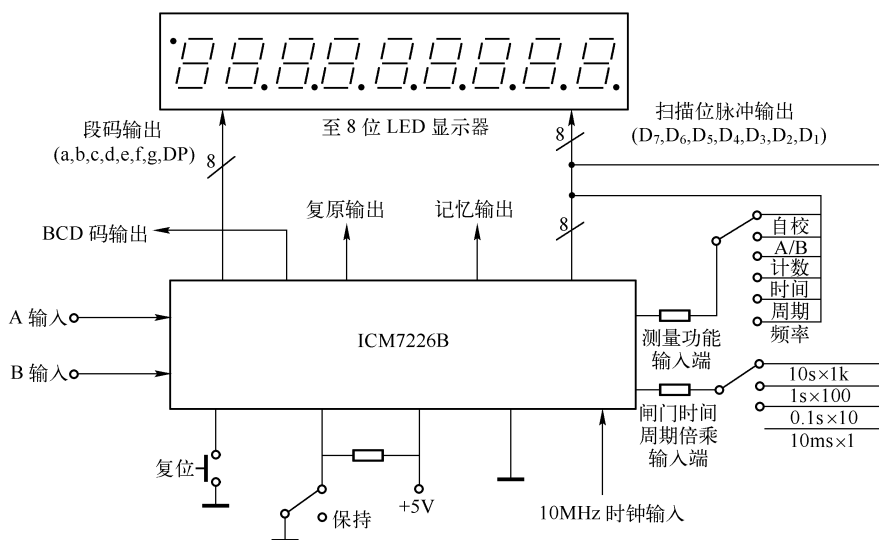


图 5-10 E312A 型通用电子计数器主机部分电路图

路，具有外频标输入、闸门时间输出、内频标输出和测量数据输出。全部测量功能包括计数、频率、频率比、周期、时间间隔测量，可适用于正弦波、方波、三角波、锯齿波、脉冲波。此外还可以进行多种功能扩展，如扩展频率上限，提高灵敏度等。

2. E312A 型通用电子计数器的性能指标

(1) 测量功能及测量范围

- ① 频率测量（A 通道）：1Hz ~ 10MHz，可扩展为 10Hz ~ 100MHz；
- ② 周期测量（A 通道）：1 μ s ~ 10s；
- ③ 频率比测量（A/B 通道）：A 通道与频率测量相同，B 通道为 1Hz ~ 2.5MHz；
- ④ 时间间隔测量（A 或 A/B 通道）：1 μ s ~ 10⁴s；
- ⑤ 累加计数（A 通道）：10⁸ - 1。

(2) 主要技术指标

- ① 输入电压范围：30mV ~ 3V；
- ② 输入阻抗：电阻 > 500k Ω 、电容 < 30pF；

- ③ 闸门时间：四种 10ms、0.1s、1s、10s；
- ④ 倍乘系数：四种 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1k$ ；
- ⑤ 时标信号：0.1 μ s (10MHz)；
- ⑥ 脉冲输入宽度： $>0.5\mu$ s；
- ⑦ 显示时间：0.2s + 测量时间。

(3) 石英晶振器性能

- ① 标称频率：5MHz (经 2 倍频为 10MHz)；
- ② 频率准确度： $\pm 5 \times 10^{-8}$ ；
- ③ 频率稳定度： $< 10^{-8}$ /日 (预热一小时后)。

3. E312A 型通用电子计数器的面板

(1) 前面板

E312A 型通用电子计数器的前面板标识如图 5-11 所示，各开关旋钮功能说明如下。

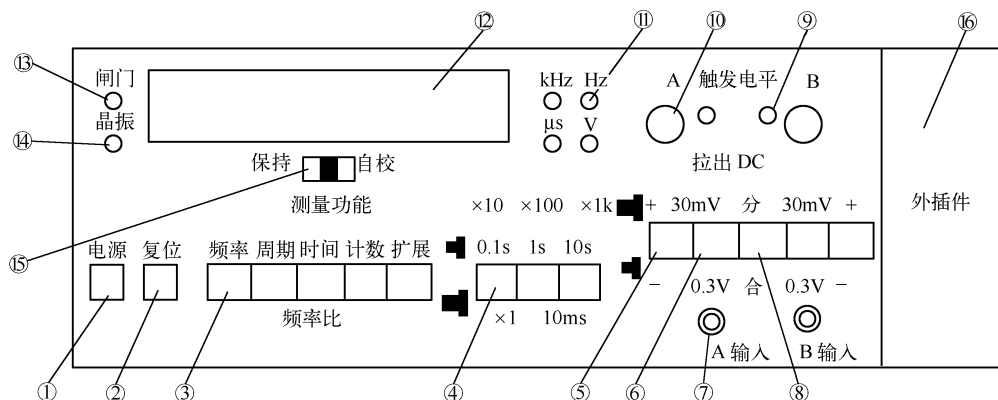


图 5-11 E312A 型通用电子计数器前面板标识图

- ① 电源开关 按下后打开整机电源，仪器进入工作状态，数码显示器亮。
- ② 复位按键 每按一次产生一次复位操作，计数器清零，重新开始计数。
- ③ 测量功能选择 有五个键，完成六种功能选择，按下分别为频率、周期、时间、计数、扩展，全部弹开时为频率比测量。
- ④ 时间与倍乘选择 有三个键，完成四种选择。测量频率时用于选择闸门时间，测量周期时用于选择周期倍乘系数，测量频率比时用于选择比值倍乘系数。
- ⑤ 触发方式选择 用于选择触发方式，弹出时为上升沿触发 (+)，按下时为下降沿触发 (-)，两个通道可分别选择。
- ⑥ 输入衰减开关 用于衰减输入信号，弹出时为 30mV 挡，信号不衰减，按下时为 0.3V 挡，信号衰减 10 倍，两个通道可分别选择。
- ⑦ 输入插口 有 A、B 两个输入插口，以适应不同测量功能的需要。
- ⑧ 通道分合开关 按下时为“合”，B 通道与其插口断开并与 A 通道相连，用于一个信号时间间隔测量；弹出时为“分”，A 和 B 均为独立通道。
- ⑨ 电平指示灯 表示触发电平的调节状态，灯均匀闪亮表示触发电平正常，长亮表示



触发电平偏高, 不亮表示触发电平偏低。

⑩ 触发电平调节 为带开关的推拉电位器, 用于调节触发电平, 可在 $+1.5 \sim -1.5V$ (不衰减) 或 $+15 \sim -15V$ (衰减时) 之间连续调节, 并兼耦合方式转换, 开关推入为 AC 耦合, 拉出为 DC 耦合, 两个通道可分别调节。

⑪ 单位指示灯 用于指示测量显示值的单位, 测频率时单位为 kHz, 测周期时单位为 μs 。Hz 和 V 供功能扩展单元用。

⑫ 数字显示器 为八位 LED 显示器, 用于测量值显示, 小数点自动定位, 最高位左上角小数点亮表示溢出。

⑬ 闸门指示灯 灯亮表示闸门开启, 灯灭表示闸门关闭, 正常测量时指示灯闪烁。

⑭ 晶振指示灯 灯亮表示晶振电源接通, 其恒温槽在加热。

⑮ 自校—保持开关 为三位拨动开关, 右边位置为自校, 仪器进行自校检查; 左边位置为保持, 可保持显示数据不变; 中间位置为测量, 可选择各测量功能。

⑯ 外插件位置 用于插入功能扩展单元, 以完成测量功能的扩展。

(2) 后面板

E312A 型通用电子计数器的后面板布置如图 5-12 所示。

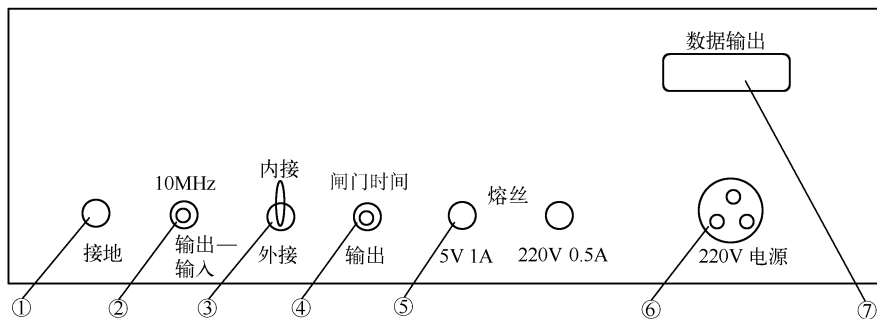


图 5-12 E312A 型通用电子计数器后面板布置图

① 接地接线柱 为仪器的接地点, 与外壳相连, 使用时应接地, 以减小电磁干扰。

② 频标输出—输入插口 用于内部频标输出或外部频标输入。当使用内部频标时, 可由此插口输出频标。当使用外部频标时, 由此插口输入。

③ 内接—外接频标选择 当开关置于“内接”时, 使用机内 10MHz 频标, 当置于“外接”时, 使用外接频标。

④ 闸门时间输出插口 当仪器处于自校或频率功能状态时, 可由此插口输出闸门时间信号。

⑤ 电源熔丝 5V 1A 为内部直流电源熔丝, 220V 0.5A 为输入交流电源熔丝。

⑥ 电源输入插口 220V 交流电源由此插口输入。

⑦ 测量数据输出插口 由此插口可输出测量值的 BCD 码。

4. E312A 型通用电子计数器的使用方法

(1) 测量前的准备

① 通电预热 插上电源插头面板晶振指示灯亮, 表示晶振电源接通, 恒温槽开始加热,

若进行高准确度测量，仪器应预热一小时。然后打开电源开关，数字显示器亮，表明整机电源接通。

② 自校检查 每次测试前应先对仪器进行自校检查，将自校—保持开关置于“自校”位置，切换闸门时间按键，数码显示器的读数应如表 5-1 所示，最高位左上角的小点表示溢出。如读数不符，说明仪器有故障，应进行检修。

表 5-1 自校准显示值

闸门时间	10ms	0.1s	1s	10s
显示数字	10000.0	10000.00	10000.000	0000.0000

(2) 主要测量功能的使用

① 频率测量 按下功能选择开关的“频率”键，被测信号由 A 插口输入，调节 A 通道触发电平至合适位置，此时显示值为被测信号的频率。选择适当的闸门时间，闸门时间越长，显示值位数越多，相对误差越小，但不要使显示值产生溢出。

② 周期测量 按下功能选择开关的“周期”键，被测信号由 A 插口输入，调节 A 通道触发电平至合适位置，此时显示值为被测信号的周期，选择适当的周期倍乘系数，以提高周期测量准确度，倍乘系数越大显示位数越多，相对误差越小，但不要使显示值产生溢出。

③ 频率比测量 功能选择开关的键全部弹开时为频率比测量。两被测信号中，频率较高的信号由 A 插口输入，频率较低的信号由 B 插口输入，此时显示值为被测信号的频率比。选择适当的比值倍乘系数，可提高频率比测量准确度，倍乘率越大显示位数越多，相对误差越小。

④ 单信号脉冲的时间间隔测量 按下功能选择开关的“时间”键，将通道分合开关置于“合”的位置，被测信号由 A 插口输入。若测量相邻脉冲的时间间隔，将 A、B 通道的触发极性置于相同位置，调节 A 通道触发电平至合适。若测脉冲信号的脉宽或休止期，将两触发极性置于不同位置，调节两通道的触发电平至 50% 处。

⑤ A、B 两信号间的时间间隔测量 按下功能选择开关的“时间”键，将两触发极性选择开关置于相同位置。测量时，主闸门启动信号由 A 插口输入，停止信号由 B 插口输入，调节两通道的触发电平至合适，此时显示值为两信号间的时间间隔，由此可以计算出两信号的相位差。测量时间间隔时，倍乘率的选择无效。

⑥ 外控计数 按下功能选择开关的“计数”键，计数信号由 A 插口输入，控制信号由 B 插口输入，调节 A 通道的触发电平至合适位置。计数的起止由闸门指示灯指示，灯亮表示闸门打开，计数器正在计数，灯灭表示闸门关闭，计数停止，此时显示值即为被测信号的计数值。

任务 3 知识引领——电子计数器的测量误差

知识 3.1 测量误差的来源

由电子计数器的测量原理可知，测量结果的准确度主要取决于计数和闸门开启时间的准



确度，它们的误差主要来源于两个方面，即系统固有误差（属于系统误差）和噪声干扰误差（属于随机误差）。

1. 系统固有误差

系统固有误差是指电子计数器自身所具有的误差，它包括量化误差和时基误差。

(1) 量化误差

量化误差又称 ± 1 误差，是所有数字化测量仪器所特有的一种误差。在电子计数器中，形成的原因是由于时间闸门的开启与计数脉冲的到来，在时间上不是同步的，在相同的开启时间内，计数值可能不同，如图5-13所示。虽然闸门开启时间都为 T ，但因为闸门开启时刻不一样，计数值一个为9，另一个却为8，两个计数值相差1。无论计数值最终为多少，它影响计数值末位 ± 1 个字，即绝对误差 $\Delta N = \pm 1$ ，其相对误差 $\gamma_N = \Delta N/N = \pm 1/N$ 。可以看出，计数值 N 越大，则量化误差越小。

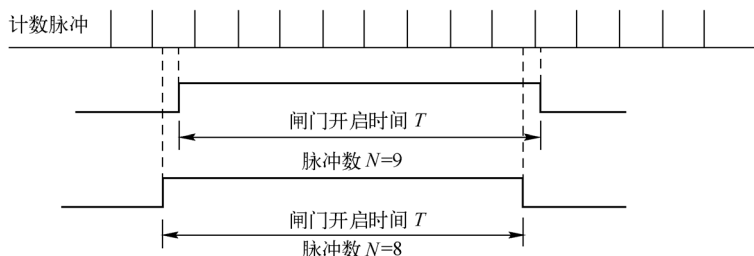


图5-13 量化误差的形成

(2) 时基误差

时基误差就是仪器内部时间标准信号所产生的误差，它主要取决于石英晶体振荡器的准确度和稳定度，其相对误差 $\gamma_s = \Delta f_s/f_s$ 的值一般在 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 数量级。

2. 噪声干扰误差

噪声干扰误差是指由于输入信号受噪声影响所产生的测量误差，属于随机误差，主要包括计数误差和触发误差。

(1) 计数误差

计数误差是指在测量频率时，由于被测信号中的干扰噪声影响，使输入信号经整形后形成的计数脉冲数发生了错误，因而产生的误差。被测信号的信噪比越高，计数误差越小。

(2) 触发误差

触发误差是指在测量周期时，由于输入信号中的干扰噪声影响，使输入信号经整形后形成的门控信号的时间与信号的周期发生了差异，因而产生的误差。它与被测信号的信噪比有关，信噪比越高，触发误差越小。

知识 3.2 频率测量误差

由频率测量原理可知，被测信号的频率 $f_x = N/T$ ，测频的准确度取决于计数值的准确度

和闸门时间 T 的准确度。计数器在一定的闸门时间内计数, 存在有 ± 1 误差, 时基信号具有一定的误差, 根据误差合成原理, 总的系统误差为

$$\gamma_F = \frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta T}{T} = \pm \left(\frac{1}{T f_x} + \left| \frac{\Delta f_s}{f_s} \right| \right) \quad (5-8)$$

式中, T 为时基闸门时间。

频率测量误差曲线如图 5-14 所示, 由误差曲线可以看出, 当闸门时间选定时, 被测信号的频率越高, 量化误差越小, 此时误差主要受时基误差的影响。当被测信号频率很低时, 量化误差就显得特别大。因此对于很低频率的信号, 不宜直接测量其频率, 而应采用测量周期的方法先测出周期, 再计算频率。

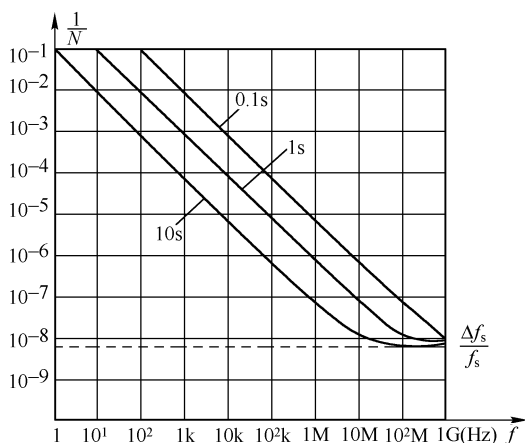


图 5-14 频率测量的误差曲线

当被测信号频率一定时, 闸门时间越长, 读数的有效位数越多, 量化误差越小。因此, 测量频率时, 选择较长的闸门时间则误差较小, 实际上闸门时间相当于频率测量的量程。

此外, 测量频率时还存在有噪声干扰所产生的计数误差, 为减小噪声干扰所产生的计数误差, 应尽量提高输入信号的信噪比, 并使触发电平合适。

知识 3.3 周期和时间测量误差

由周期测量原理可知, 被测信号的周期 $T_x = N \cdot T_c$, 周期测量与频率测量时的系统误差来源基本相同, 存在有量化误差和时标误差, 总的系统误差为

$$\gamma_T = \frac{\Delta T_x}{T_x} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta T_c}{T_c} = \pm \left(\frac{T_s}{m k T_x} + \left| \frac{\Delta f_s}{f_s} \right| \right) \quad (5-9)$$

式中, m 为时标倍频器的倍频系数, k 为信号分频器的分频系数 (又称周期倍)。

周期测量系统误差曲线如图 5-15 所示, 由误差曲线可以看出, 被测信号的周期越长, 即频率越低, 量化误差越小, 故对于频率很低的信号, 采用测量周期的方法准确度较高。当被测周期一定时, 周期倍乘系数越大, 读数的有效位数也越多, 量化误差越小。因此, 测量周期时, 选择较大的倍乘系数误差较小, 实际上周期倍乘系数相当于周期测量的量程。

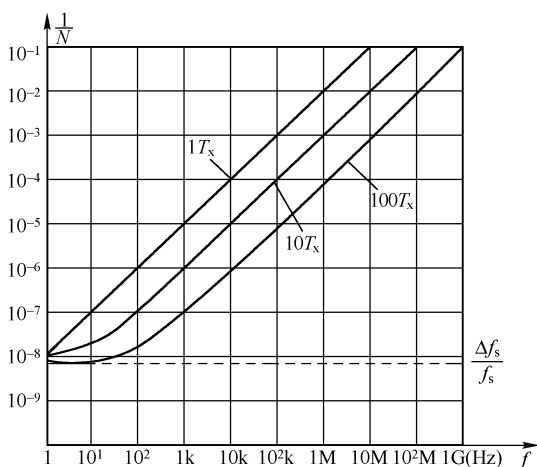


图 5-15 周期测量的系统误差曲线

此外,测量周期时还存在有噪声干扰所产生的触发误差,所以周期测量误差应包括三项:量化误差,时标误差和触发误差。为减小噪声干扰所产生的触发误差,应尽量提高输入信号的信噪比,并使触发电平合适。

时间间隔测量误差与测周期时基本相同,由于此时输入信号均为脉冲信号,触发误差要比测量周期时小,但量化误差要比测量周期时大,这是因为测量时间间隔时不能像测量周期时那样,用增大倍周期乘系数的方法来减小量化误差。

知识 3.4 中界频率的确定

通过上述分析可知,用电子计数器直接测频与测周法测频,其相对误差是不一样的。被测信号频率越高,直接测量频率的误差就越小;反之,被测信号频率越低(周期越大),测量周期的误差就越小。由于频率与周期互为倒数,实际上只要测出其中一个量,另一个量通过倒数运算即可得到。因此,为了提高测量精确度,我们自然会想到测量高频信号的频率时,用测频的方法,直接测量被测信号的频率;而测低频信号的频率时,先用测周的方法,测出被测信号的周期,再换算成频率。这里所谓的高频或低频,是相对于电子计数器的中界频率而言的。

中界频率的定义为:电子计数器测量信号的频率,若采用直接测频法和测周测频法的误差相等,则该频率称为中界频率 f_0 。

若忽略随机误差,只考虑量化误差时,根据中界频率的定义,令 $\gamma_F = \gamma_T$,可得到中界频率的计算公式:

$$f_0 = \sqrt{\frac{mkf_s}{T}} \quad (5-10)$$

式中, f_s 为晶振频率, T 为闸门时间, m 为时标倍频系数, k 为周期倍乘系数。

【例 5.1】 用电子计数器测量 $f_x = 2\text{kHz}$ 信号的频率,分别采用测频(闸门时间为 1s)和测周(时标倍频系数为 1 ,周期倍乘率为 1)两种测量方法,已知晶振频率 $f_s = 10\text{MHz}$,忽略晶振频率误差,求由量化误差引起的测量误差和中界频率。

解：测频时，量化误差为

$$\gamma_F = \frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T} = \pm \frac{1}{2 \times 10^3 \times 1} = \pm 5 \times 10^{-4}$$

测周时，量化误差为

$$\gamma_T = \frac{\Delta T_x}{T_x} = \frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{f_s \cdot T_x} = \pm \frac{2 \times 10^3}{10^7} = \pm 2 \times 10^{-4}$$

中界频率为

$$f_0 = \sqrt{\frac{mkf_s}{T}} = \sqrt{\frac{1 \times 10^7}{1}} = 3.16 \text{ kHz}$$

任务 4 仪器介绍——等精度电子计数器

实现等精度频率/时间测量的仪器叫做等精度计数器，也称倒数计数器。它是在通用计数器的基础上发展起来的，由于采用了微处理器技术，保证了在同一闸门时间内对不同频率信号的等精度测量，因而可获得较高的分辨力和精确度。它不仅包括通用计数器的频率、周期和时间测量等基本功能，还可对测量结果完成一定的运算，并可通过通信接口进行程控，与计算机和其他测量仪器组成自动测试系统。

知识 4.1 等精度频率测量原理

等精度频率/时间测量技术是将被测信号经输入通道放大整形后产生的计数脉冲和由时基电路产生的时基脉冲分别在事件（E）计数器和时间（T）计数器中累加存放，然后根据预先编制好的管理程序，由微处理器对存储在两个计数器中的数据进行运算、比较等处理，然后把处理结果送到显示单元显示。

等精度频率测量的原理如图 5-16 所示。测量时，仪器先产生闸门预备信号，由被测信号脉冲的上升沿触发同步门 E，主门 E 开启，E 计数器计数。与此同时，时基信号脉冲的上升沿触发同步门 T，主门 T 开启，T 计数器计数。然后进行运算，得出测量结果。

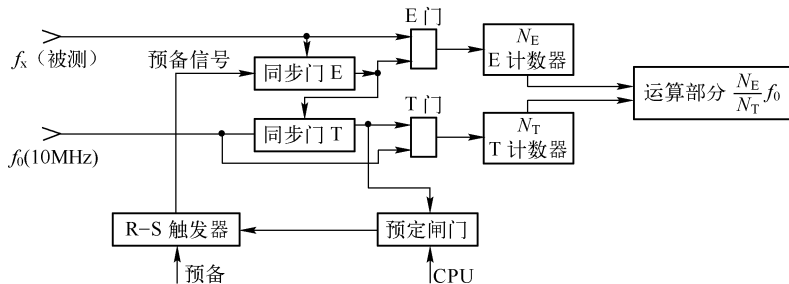


图 5-16 等精度频率测量原理

等精度频率测量的逻辑时序如图 5-17 所示。从时序图中可以看出：预选闸门时间 T' 不同于实际意义的闸门时间即测量时间 T ，或者说，测量时间总要比预选闸门时间长一些，以保证获得的测量时间是被测信号周期的整数倍，这是等精度计数器不同于一般通用计数器的



特点之一。

在闸门时间 T 内, E 计数器累计了 $N_E = f_x \cdot T$ 个被测信号脉冲, T 计数器累计了 $N_T = f_0 \cdot T$ 个时钟脉冲, 由运算部分 (微处理器) 可算出被测信号频率 f_x , 并显示出来。即 $f_x = f_0 N_E / N_T$ 。

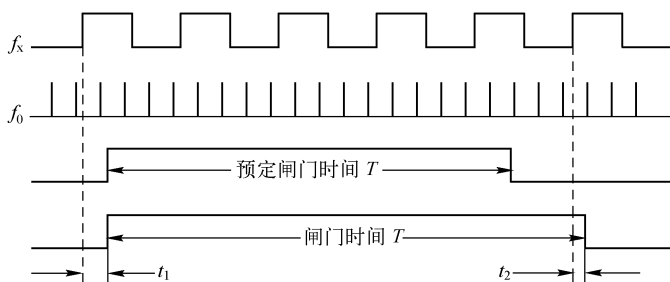


图 5-17 等精度测量的逻辑时序图

如图 5-17 所示, 每次测量, 闸门时间 T 总是被测信号周期的整数倍, 因而消除了通用计数器测频时 ± 1 个被测信号周期的量化误差。采用倒数计数方式, 就将测量的量化误差从 ± 1 个被测信号周期转变为 $\pm 1/f_0$ 。在任何一档预选闸门时间的情况下, 系统量化误差在晶振频率为 10MHz 时恒为 10^{-7} ; 而在同一闸门时间内对于不同频率的信号, 其测量分辨率均相等, 因此称为等精度频率测量。

知识 4.2 时间间隔平均测量原理

等精度电子计数器对于周期和时间间隔的测量, 采用的是时间间隔平均测量技术, 可减小时间测量误差, 其工作时序如图 5-18 所示。

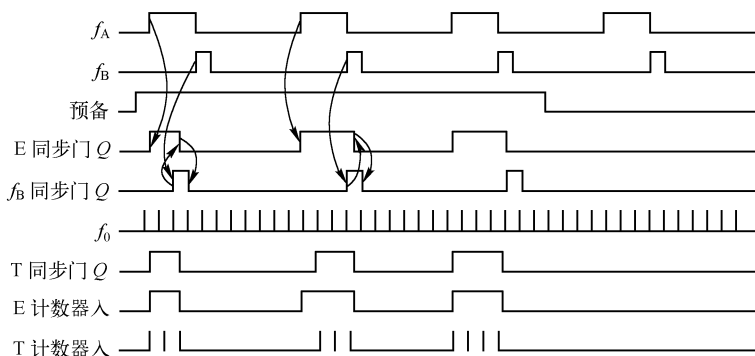


图 5-18 时间间隔测量时序图

从图 5-18 中可以看出, 当预备信号到来后, f_A 将 E 同步门打开; 当 f_B 到来后, B 同步门打开, 其 Q_B 输出一个负脉冲, 通过与门到 E 同步门 R 端, 将 E 同步门关闭。此时 Q_E 下降沿将 B 同步门关闭, 通过与门电路 E 同步门输出一个脉宽为 $A - B$ 的正脉冲。

如图 5-16 所示, 在预定闸门时间内, E 计数器计 N_E 个脉宽为 $A - B$ 的方脉冲; T 计数器计 N_T 个 T_0 脉冲, 由微处理器运算后, 得出 $A - B$ 时间间隔数。此时的显示位数取决于 T

计数器中 N_T 的个数。则 $T_x = T_0 N_T / N_E$ 。

从图 5-16 中还可以看出, 单次时间间隔测量的分辨力为晶振周期 T_0 。为了得到较高的分辨力, T_0 越小越好, 一般取 T_0 为 100ns (或 10ns), 即晶振频率为 10MHz (或 100MHz)。采用时间平均测量法 (即测量多个 $A-B$ 时间间隔) 时, 可根据概率方法将分辨力 T_0 提高到 T_0/\sqrt{N} , 其中 N 为测量平均次数, 使测量误差进一步减小。

知识 4.3 等精度电子计数器的使用

在这里以 EE3376 型等精度可编程计数器为例, 说明其操作使用方法。

1. 面板显示功能

启动 “POWER” 键, 接通电源, 这时面板上除 “LEVEL A”、“LEVEL B” 两灯外, 所有指示灯全亮, 显示器显示全 “8” 1 秒, 然后显示本机型号 “EE3376”。

2. 功能键操作

功能键可以上下换挡, 只要分别按 \uparrow 、 \downarrow 键即可。按一次键, 功能上 (或下) 移一次。

按 “RESET” 键是对微机重新进行初始化。在进行某一测量时, 如不需要继续测量, 而要重新测量时可按下 “CLEAR” 键, 此时仍进行原功能的测量。

3. A 通道频率测量 (f_A) 或周期测量 (T_A)

被测信号 f_x 从 “INPUT A” 输入, “COM” 键弹起。“LEVEL A” 可以调节触发电平, 调节范围为 $-1.5 \sim +1.5V$, 触发电平可用万用表从旁边的检测孔测量。当电位器调至灯闪亮时, 触发灵敏度为最高。如 f_x 为正信号, 触发电平往 “+” 方向调节; 如 f_x 为负信号, 触发电平往 “-” 方向调节。

4. A→B 时间间隔测量 (T_{A-B})

启动信号从 “INPUT A” 输入, 停止信号从 “INPUT B” 输入, 调节触发电平使 A、B 通道触发指示灯闪烁。调节 LEVEL A 和 LEVEL B 的电平要一致 (用万用表在检测孔检测)。

5. TOT A (累计测量)

信号从 “INPUT A” 输入, 同时按下 “STA/STP” 键, 灯亮, 表示计数开始; 再按一次该键, 灯灭, 表示停止计数, 显示计数结果; 再按一次, 灯亮, 则表示继续计数, 并在上次测量结果上继续累计。

6. C 通道频率测量 (f_c)

当被测信号频率在 100MHz \sim 1.5GHz 范围时, f_x 应从 “INPUT C” 输入。

7. GPIB 通用接口

GPIB 通用接口具有完全的源挂钩功能、完全的受者挂钩功能、除只讲外的完全讲功能、



除只听外的完全听功能、完全的串行点名功能和完全的远控/本控功能。

8. EE3376 型用于自动测试

EE3376 型可编程通用计数器用于自动测试时,其使用说明如下:

(1) 由于接入自动测试系统的主控机不同,发布程控命令的方式也不同。

(2) 在远控状态下,每次测量完毕数据送显示的同时,用这组数据去刷新数据存储区,以备系统主控机随时读数。

(3) 当系统主控机要求该仪器“听”时,无论仪器处于什么测量状态,均能立即响应,并按输入的程控命令调整状态。

(4) 当系统主控机要求该仪器“讲”时,若这时仪器处于测量状态,则仪器暂不响应,直到仪器测量完毕,数据刷新之后,再响应系统主控机的“讲”命令,将这组数据上传;若此时仪器未处于测量状态,则仪器立即响应此命令,并将最新测量的一组数据上传。

(5) 接口总线输出格式是以一行为单位,一行最多为 32 个字符(包括空白字符)。

任务5 应用实训——电子计数器应用实训

实训 5.1 信号源信号参数测量实训

1. 实训目的

- (1) 学会通用电子计数器的使用方法;
- (2) 掌握信号源信号参数的测试技能。

2. 实训设备

通用电子计数器、函数信号发生器。

3. 实训内容

用通用电子计数器测量函数信号发生器输出信号的参数。

(1) 测量仪器准备

① 电子计数器通电预热 插上电源插头,面板晶振指示灯亮,表示晶振电源接通,恒温槽开始加热,预热一小时。然后打开电源开关,数字显示器亮,表明整机电源接通。

② 自校检查 每次测试前应先对仪器进行自校检查,将自校—保持开关置于“自校”位置,切换闸门时间按键,数码显示器读数应如表 5-1 所示,如读数不符,说明仪器有故障,应进行检修。

③ 电子计数器自校检查 每次测试前应先对仪器进行自校检查,将自校—保持开关置于“自校”处,切换闸门时间键,观察数字显示器读数是否与表 5-1 所示相符。

④ 函数信号发生器预热 插上电源插头,面板显示器亮,预热 15min 后再开始使用。

(2) 频率测量

按下功能选择开关的“频率”键，将函数信号发生器的输出信号由 A 插口输入，调节 A 通道的触发电平至合适位置，选择适当的闸门时间，以提高频率测量的准确度。分别测量 3 种波形的 2 种不同频率的信号，将仪器的挡位选择和测量数据填入表 5-2 中。

表 5-2 频率测量的挡位选择和测量数据

被测信号	闸门时间	通道分合	触发极性	耦合方式	输入衰减	频率 (Hz)
正弦波 f_1						
正弦波 f_2						
方波 f_1						
方波 f_2						
三角波 f_1						
三角波 f_2						

(3) 周期测量

按下功能选择开关的“周期”键，将函数信号发生器的输出信号由 A 插口输入，调节 A 通道的触发电平至合适位置，选择适当的周期倍乘率，以提高周期测量的准确度。分别测量 3 种波形的 2 种不同周期的信号，将仪器的挡位选择和测量数据填入表 5-3 中。

表 5-3 周期测量的挡位选择和测量数据

被测信号	周期倍乘率	通道分合	触发极性	耦合方式	输入衰减	信号周期 (s)
正弦波 T_1						
正弦波 T_2						
方波 T_1						
方波 T_2						
三角波 T_1						
三角波 T_2						

(4) 脉冲宽度测量

按下功能选择开关的“时间”键，通道分合开关置于“合”的位置，将函数信号发生器产生的脉冲信号，由 A 插口输入，正确设置触发方式，并调节 A 通道触发电平至合适位置。分别测量 2 种不同周期 T 、3 种不同脉宽 τ 的脉冲信号，具体要求由实训老师给出，将仪器的挡位选择和测量数据填入表 5-4 中。

表 5-4 脉宽测量的挡位选择和测量数据

被测信号	通道分合	A 触发极性	B 触发极性	耦合方式	输入衰减	脉冲宽度 (s)
$T_1 \tau_1$						
$T_1 \tau_2$						
$T_1 \tau_3$						
$T_2 \tau_1$						
$T_2 \tau_2$						
$T_2 \tau_3$						



实训 5.2 电视机扫描电路测试实训

1. 实训目的

- (1) 掌握通用电子计数器的使用方法；
- (2) 学会电视机扫描电路的测试技能。

2. 实训设备

通用电子计数器、黑白或彩色电视机。

3. 实训内容

(1) 测试设备准备

- ① 仪器准备 电子计数器通电预热和自校检查与实训 5.1 相同。
- ② 电视机准备 先打开电视机后盖，抽出主电路板，找好相应的测量点；插上电视机电源插头，显像管出现光栅，调整相应旋钮使电视机正常收视，然后再开始进行测量。

(2) 行同步范围测量

行同步范围是指电视机能维持同步状态的行频调节范围，测量方法如下：

将电子计数器置于频率测量方式，选择适当的闸门时间，把行振荡输出信号接入 A 输入插口，调节行振荡线圈，使仪器显示标准行频（15625Hz），同时电视机上出现稳定的图像。然后，先调节行振荡线圈，使行频缓慢升高，直至屏幕上的图像出现失步，记下此时的频率读数 f_H 。再调节行振荡线圈，使行频缓慢降低，直至屏幕上的图像又出现失步，记下此时的频率读数 f_L ，则行同步范围 $\Delta f = f_H - f_L$ ，一般要求行同步范围大于 500Hz。

将仪器的挡位选择和测量数据填入表 5-5 中。

表 5-5 行同步范围测量挡位选择和测量数据

挡位选择	闸门时间	输入通道	触发极性	耦合方式	输入衰减	通道分合
测量数据	f_H	f_L	Δf			

(3) 行脉冲宽度测量

行脉冲宽度是指行脉冲信号的上升沿和下降沿之间的时间间隔，测量方法如下：

将仪器置于时间测量方式，将通道分合开关置于“合”的位置，把行振荡电路的输出信号接入 A 输入端口，按测量原理正确设置触发极性，调节 A 触发电平在合适位置，此时显示的读数即为行振荡脉冲宽度，正常脉冲宽度应为 18 ~ 20 μ s。

将仪器的挡位选择和测量数据填入表 5-6 中。

表 5-6 行脉冲宽度测量挡位选择和测量数据

挡位选择	通道分合	A 触发极性	B 触发极性	耦合方式	输入衰减	脉冲宽度 (s)

(4) 场振荡周期测量

场振荡周期是指场振荡信号的重复周期，测量方法如下：

将仪器置于周期测量方式，选择适当的周期倍乘率，置衰减开关在 0.3V 位置，把场振荡电路输出信号接入 A 输入端口，调节 A 触发电平，使其指示灯均匀闪亮，此时显示的读数即为场振荡周期，标准场振荡周期为 20ms。

将仪器的挡位选择和测量数据填入表 5-7 中。

表 5-7 场振荡周期测量挡位选择和测量数据

挡 位 选 择	周 期 倍 乘	通 道 分 合	触 发 极 性	耦 合 方 式	输 入 衰 减	信 号 周 期 (s)

实训 5.3 电子计数器测量误差计算实训

1. 实训目的

- (1) 加深计数器测量误差和中介频率的基本概念；
- (2) 掌握计数器测量误差和中介频率的计算方法。

2. 实训设备

函数信号发生器，通用电子计数器。

3. 实训内容

计算通用电子计数器在不同测量挡位上的量化误差和中介频率。

(1) 已知被测信号频率为 10kHz，电子计数器晶振频率为 10MHz，求闸门时间挡位不同时的频率测量误差和中介频率，将计算结果填入表 5-8 中，并总结其规律。

表 5-8 频率测量误差和中介频率

闸门时间挡位	0.01s	0.1s	1s	10s	结 论
频率测量误差					
中介频率					

(2) 已知被测信号周期为 0.01s，电子计数器的时标信号周期为 10^{-7} s，求周期倍乘率挡位不同时的周期测量误差和中介频率，将计算结果填入表 5-9 中，并总结其规律。

表 5-9 周期测量误差和中介频率

周期倍乘挡位	$\times 1$	$\times 10$	$\times 100$	$\times 1000$	结 论
周期测量误差					
中介频率					



本项目小结

1. 频率和时间是电子技术领域内两个重要的基本参量,在电子测量中,频率和时间的测量精确度是最高的。频率的测量方法有很多,按照其工作原理可分为谐振法、比较法、示波器法和电子计数器法等。其中,电子计数器法测量信号的频率、周期和时间等参量,具有测量精确度高,测量范围宽,测量速度快,便于实现测量过程的自动化等优点,因此是目前测量频率、周期和时间等参量的主要仪器。

2. 通用电子计数器一般由输入通道、主闸门、计数器、显示电路、时基形成电路、逻辑控制电路和电源电路组成,可用来测量频率、周期、时间间隔、频率比、累加计数和自校。在测量不同参数时,由工作方式选择开关通过改变计数脉冲信号和闸门控制信号来实现不同的测量功能。

3. 电子计数器的测量误差主要包括量化误差、标准频率误差和触发误差。频率测量误差有量化误差、时基误差和计数误差,周期测量误差有量化误差、时标误差和触发误差。在使仪器用时,应选择合适的闸门时间、周期倍乘率及比值倍乘率,并尽量提高被测信号的信噪比,以减小测量误差,提高测量的准确度。

4. 等精度计数器也称倒数计数器。它是在通用计数器的基础上发展起来的,由于采用了微处理器技术,保证了在同一闸门时间内对不同频率信号的等精度测量,因而可获得较高的分辨力和精确度。它不仅包括通用电子计数器的频率、周期和时间测量等基本功能,还可以对测量结果完成一定的运算,并可通过通信接口进行程控,与计算机和其他测量仪器组成自动测试系统。

项目5 思考题

1. 频率的测量方法有哪些?电子计数器测量的特点是什么?
2. 电子计数器有哪几种类型?通用电子计数器的测量功能有哪些?
3. 电子计数器的主要性能指标有哪些?
4. 通用电子计数器由哪几部分组成?各部分作用是什么?
5. 简述频率、频率比测量原理。
6. 简述周期、时间间隔测量原理。
7. 什么是量化误差?如何减小量化误差?
8. 什么是触发误差?如何减小触发误差?
9. 测量不同时间间隔时,如何正确选择触发极性和触发电平?
10. 什么是等精度计数器?等精度计数器的特点是什么?
11. 简述等精度计数器测量频率的基本原理。
12. 简述等精度计数器测量周期和时间间隔的原理。



项目 6 频域测量仪器及应用



本项目任务目标

1. 学习频域测量的基本知识：应了解频域测量的原理、频域测量的内容、常用频域测量仪器的类型和频域测量仪器的发展趋势；
2. 学习频率特性测试仪的相关知识：应了解频率特性的测试方法、频率特性测试仪的组成和工作原理，掌握频率特性测试仪的使用；
3. 学习频谱分析仪的相关知识：应了解频谱分析仪的分类、应用领域、工作原理和主要技术指标，掌握频谱分析仪的使用；
4. 学习失真度测试仪的相关知识：应了解谐波失真度的定义及测量方法，失真度测量仪的工作原理，掌握失真度测量仪的使用；
5. 进行频域测量的应用实训：通过训练掌握放大器的频率特性测试、鉴频器的鉴频特性测量以及音频放大器失真度测量的基本技能。

任务 1 知识引领——频域测量基本知识

知识 1.1 频域和时域的关系

对于任何一个信号，都具有时间—频率—幅度的三维特性，信号的幅度既可表示为时间 t 的函数，又可以表示为频率 f （或角频率 ω ）的函数；既可以在时域对它进行测量分析，也可以在频域进行测量分析，以获得不同的变化特性，频域和时域的关系如图 6-1 所示。

时域测量分析是研究信号的瞬时幅度 u 与时间 t 的变化关系，如信号通过电路后幅度的放大、衰减或畸变等。通过时域测量可测定电路是否工作在线性区、电路的增益大小及时间响应特性等。实际工作中常用的示波器就是典型的时域测量分析仪器，常用它来观测信号电压随时间的变化，但它无法获得信号中包含哪些频率成分、它们之间的相对幅度如何等信息，也无法得到信号通过某个系统后频率成分是否产生了变化及变化的大小等信息，这些都必须借助于频域测量分析来完成。

频域测量分析则是研究信号中各频率分量的幅值 u 与频率 f 的关系，主要包括线性系统的频率特性测量和信号的频谱分析。频率特性测量和频谱分析都是以频率为自变量，以频率

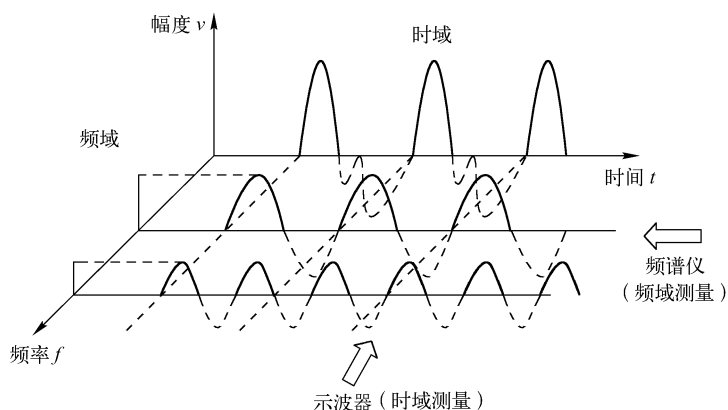


图 6-1 时域和频域的关系

分量的信号幅值为因变量进行分析的，需要由频域测量仪器来完成。例如，频率特性测试仪利用扫频测量法，可直接在显示屏上显示被测系统的频率响应特性；频谱分析仪是对信号本身进行分析或对系统的非线性失真大小进行测量，以确定信号所含的频率成分，了解信号的频谱占用情况，以及非线性失真特性。

时域测量分析与频域测量分析虽然可以用来反映同一信号的特性，但是它们分析的角度不同，针对不同的实际情况，时域测量和频域测量各有其具体的适用场合，两者是相辅相成、互为补充的。

知识 1.2 频域测量的主要内容

根据实际应用的需求, 频域分析与测量的对象和目的也各不相同, 通常有以下一些。

(1) 频率特性测量

频率特性测量是对电路或系统的频率特性进行测量，包括幅频特性、相频特性、频带宽度及回路 Q 值等。

(2) 选频测量

选频测量是通过调谐滤波的方法，选出并测量信号中某些频率分量的大小，如测量电路输出信号的谐波频率和幅值。

(3) 频谱分析测量

频谱分析测量是分析信号中所含的各个频率分量的幅值、功率或能量，以及振荡信号源的相位噪声特性、空间电磁场干扰等。

(4) 调制度分析测量

调制度分析测量是对各种频带的射频信号测量其调制度，如调幅波的调幅系数、调频波的频偏、调频指数以及它们的寄生调制等参量。

(5) 谐波失真度测量

信号通过非线性器件或系统都会产生新的频率分量，称为非线性失真，这些新的频率分量包括谐波和互调。谐波失真度测量就是对这些谐波和互调失真的大小进行测量，如测量正弦信号发生器、音频功率放大器等的失真度。

知识 1.3 频域测量仪器的类型

根据实际应用的需求,常用频域分析与测量仪器有以下几种类型。

(1) 频率特性测试仪

频率特性测试仪主要用于测量电路或系统的幅频特性、带宽及回路 Q 值。

(2) 频谱分析仪

频谱分析仪主要用于测量和分析信号中所含的各个频率分量的幅值或功率,以及振荡信号源的相位噪声特性、空间电磁场干扰等。

(3) 失真度测量仪

失真度测量仪主要用于测量正弦信号源输出波形的失真度和音频放大器的失真度。

(4) 谐波分析仪

谐波分析仪主要用于分析和测量信号中所含的谐波频率及其幅度大小。

(5) 调制度测量仪

调制度测量仪主要用于测量调幅波的调幅系数、调频波的频偏、调频指数等。

任务 2 仪器介绍——频率特性测试仪

频率特性测试仪,简称扫频仪,是利用扫频测量法在示波管上直接显示被测电路或系统频率特性曲线的仪器,它是在静态逐点测量法的基础上发展起来的一种快速、简便、直观、实时、动态、多参数的测量仪器,广泛应用于电子技术领域。在家用电器(电视机、录像机等)、电子设备的测试和调整中都离不开扫频仪。

知识 2.1 频率特性的测试方法

频率特性的测试方法有点频测量法和扫频测量法。

1. 点频测量法

点频测量法就是通过逐点测量一系列规定频率点上的系统增益来确定幅频特性曲线的方法,其原理框图如图 6-2 所示。其测量方法是:在被测系统的整个工作频率范围内,改变输入信号的频率,在改变输入信号频率的同时,应保持输入电压的幅度恒定(用电压表 I 来监视);在被测系统输出端用电压表 II 测出各频率点相应的输出电压值,并做好记录。然后在直角坐标系中,以横轴表示频率的变化,以纵轴表示输出电压幅度的变化,连接各个点,就可描绘出系统的幅频特性曲线,如图 6-3 所示。

显然,这种方法操作烦琐,工作量大,由于频率点是不连续的,容易漏测特性曲线的某些细节,而且用这种方法测得的只是静态特性,而实际电路的工作状态往往是动态的。

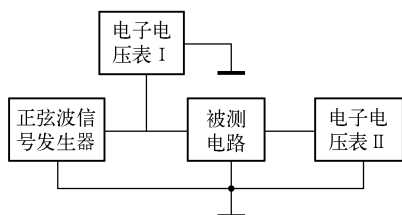


图 6-2 点频测量法原理框图

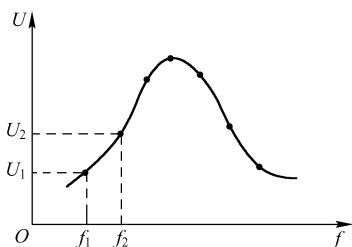


图 6-3 幅频特性曲线

2. 扫频测量法

扫频测量法可以实现对被测电路简捷快速的动态测量和图形曲线显示。它是以扫频信号发生器代替图 6-1 中的正弦波信号发生器，并利用示波器显示波形的原理，将被测电路的幅频特性直接显示在示波管屏幕上，其原理框图如图 6-4 所示。

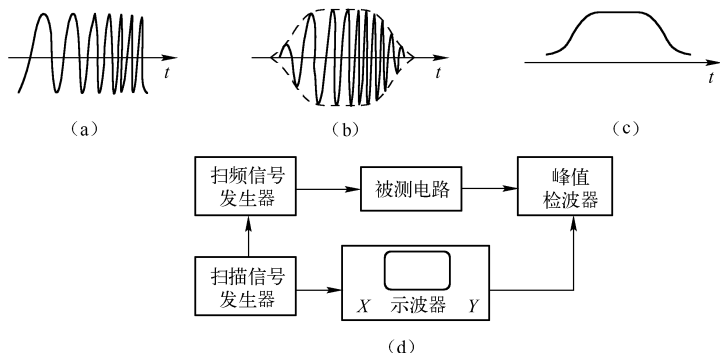


图 6-4 扫频测量法原理框图

图中，扫频信号发生器实际上是一个调频振荡器，产生幅度不变振荡频率受扫描信号控制的调频信号，如图 (a) 所示。该信号通过被测电路后，信号幅度将随被测电路的幅频特性而变化，如图 (b) 所示。经检波后，将幅度随频率变化的包络信号加到示波器的垂直通道，同时将扫描信号加到示波器的水平通道。由于示波器的水平扫描电压，同时又用于调制扫频信号发生器的频率。因此，示波器屏幕光点的水平位移与扫频信号的频率随时间的变化规律完全一致，所以示波器的水平轴也就变换成了频率轴。也就是说，在屏幕上显示的图形是被测电路的幅频特性曲线，如图 (c) 所示。

扫频测量法简单、速度快，可以实现频率特性测量的自动化。由于扫频信号的频率变化是连续的，所以不会像点频测量法那样由于测量的频率点不够密而遗漏某些被测频率特性的细节。扫频测量法反映的是被测电路的动态特性，这一点对某些系统的测量尤为重要，如滤波器的动态滤波特性的测量等。此外，用扫频法测量电路时，还能边测量边进行调试，大大地提高了调试的工作效率。扫频测量法的不足之处是测量的准确度比点频法低。

知识 2.2 频率特性测试仪的工作原理

扫频仪主要由扫频信号发生器、频标发生器、波形显示电路三大部分组成。其组成框图

如图 6-5 所示。其中检波探头（扫频仪附件）是扫频仪外部的一个电路部件，用于直接探测被测电路的输出电压。检波探头与示波器的衰减探头外形相似（体积稍大），但电路结构和作用不同，它内藏检波二极管，起包络检波作用。

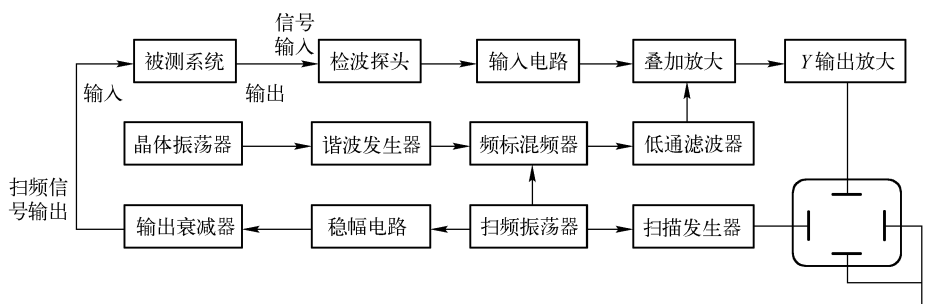


图 6-5 扫频仪的组成框图

由图可见，由扫频仪的输出端口输出等幅扫频信号，作为被测系统的输入测试信号；其输入端口接收被测系统经检波后的输出信号，扫频仪与被测电路构成了闭合回路。

1. 扫频信号发生器

扫频信号发生器由扫描发生器、扫频振荡器、稳幅电路和输出衰减器组成。扫频信号发生器具有正弦波信号发生器的工作特性，其输出信号的幅度和频率均可调节。此外它还具有扫频工作特性，其扫频范围（即频偏宽度）也可以调节。测量时要求扫频信号的寄生调幅应尽可能小，扫频范围要达到测试的要求。

(1) 扫描发生器

扫描发生器用于产生扫频振荡器所需的调制信号及示波管所需的扫描信号。扫描发生器的输出信号有时不是锯齿波信号，而是正弦波或三角波信号。这些信号一般是由 50Hz 市电通过降压后获得，这样设计的目的是为了简化仪器的电路结构，降低造价。由于调制信号与扫描信号同步变化，因此这样设计并不会使所显示的幅频特性曲线失真。

(2) 扫频振荡器

扫频振荡器的作用是产生等幅的扫频信号。在目前的扫频仪中，扫频振荡器通常采用以下两种电路形式。

① 变容二极管扫频振荡器 变容二极管扫频振荡器的原理如图 6-6 所示。图中， VT_1 组成电容三点式振荡电路； VD_2 、 VD_3 为变容二极管，其结电容随反向偏置电压而变化，它们与 L_1 、 L_2 及 VT_1 的结电容构成振荡回路； C_1 为隔直电容； L_2 为高频阻流圈。调制信号经 L_2 同时加至变容二极管 VD_2 、 VD_3 的两端，当调制电压随时间做周期性变化时， VD_2 、 VD_3 结电容的容量也随之变化，使振荡器的频率发生变化，产生扫频信号。

② 磁调制扫频振荡器 所谓磁调制扫频，就是用调制电流所产生的磁场去控制振荡回路的电感量，从而产生频率随调制电流变化的扫频信号。

一个带磁芯的电感线圈，其电感量 L_c 与该磁芯的有效导磁系数 μ_c 之间的关系为

$$L_c = \mu_c L \quad (6-1)$$

式中， L 是空心线圈的电感量。

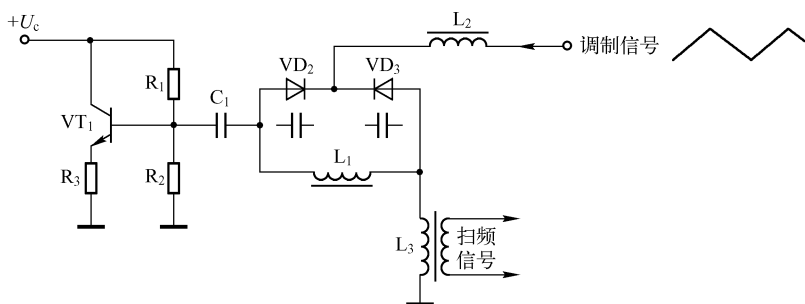


图 6-6 变容二极管扫频振荡器原理图

若能使 μ_c 随调制电压的变化而变化，那么 L_c 也将随之变化。如果将一个电感量 L_c 随调制电压的变化而变化的线圈接入振荡回路，便可产生扫频信号。磁调制电感的结构如图 6-7 所示。

图 6-7 中 M 为普通磁性材料， m 为高导磁率、低损耗的高频铁氧体磁芯， M 与 m 构成闭合磁路。 W_1 为励磁线圈，当其通过调制电流时，将使 M 中的磁通随之变化，磁芯 m 的有效导磁系数 μ_c 也将发生变化，从而导致磁芯线圈的电感量 L_c 的变化，使振荡器频率发生变化。 W_2 为偏磁线圈，用于在 M 及 m 中建立一个直流磁通，调节 R_p 也可改变 L_c 的大小，因而可以改变扫频振荡器的中心频率 f_0 。

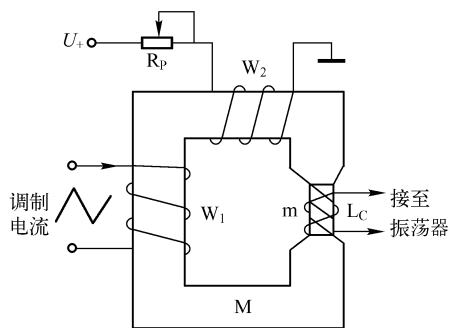


图 6-7 磁调制电感的结构图

磁调制扫频的特点是电路简单，并能在寄生调幅较小的条件下获得较大的扫频宽度，所以这种方法获得了广泛的应用。如 BT-3、BT-5 等扫频仪采用的都是磁调制扫频振荡器。

(3) 稳幅电路

稳幅电路的作用是减少寄生调幅。扫频振荡器在产生扫频信号的过程中，都会不同程度地改变着振荡回路的 Q 值，从而使振荡幅度随调制信号（振荡频率）的变化而变化，即产生了寄生调幅。抑制寄生调幅的方法很多，最常用的方法是，从扫频振荡器的输出信号中取出寄生调幅分量并加以放大，再反馈到扫频振荡器去控制振荡管的工作点或工作电压，使输出的扫频信号振幅保持恒定。

(4) 输出衰减器

输出衰减器用于改变扫频信号的输出幅度。在扫频仪中，衰减器通常有两组，一组为粗衰减，一般按每挡 10dB 或 20dB 步进衰减；另一组为细衰减，按每挡 1dB 或 2dB 步进衰减。通常扫频仪的输出衰减量可达 100dB。

2. 频标发生器

频标发生器由晶体振荡器、谐波发生器器、频标混频器和带通滤波器组成。频标发生器的作用是产生具有频率标志的图形，叠加在幅频特性曲线上，如图 6-8 所示，以便读出曲线上各点相应的频率值，频标的产生方法通常是采用差频法。

晶体振荡器产生的信号经谐波发生器产生出一系列的谐波分量, 这些基波和谐波分量与扫频信号一起进入频标混频器进行混频。当扫频信号的频率正好等于基波或某次谐波的频率时, 混频器产生零差频 (零拍); 当两者的频率相近时, 混频器输出差频, 差频值随扫频信号瞬时频偏的变化而变化。差频信号经低通滤波及放大后形成菱形图形, 这就是所谓菱形频标, 测量时利用频标可读出曲线上各点的频率值。

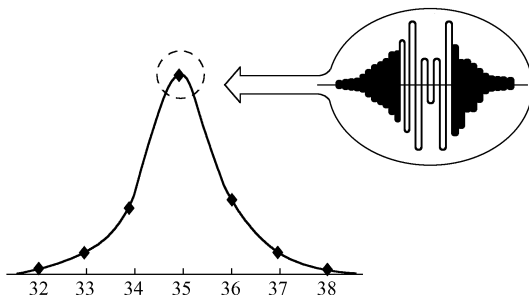


图 6-8 带有频标的幅频特性曲线

因为菱形频标具有一定的频率宽度, 所以只有当菱形频标的频率宽度和扫频范围相比很窄时, 才能形成一个很细的频标。

通常 1MHz 的频标间隔较窄, 幅度较小; 10MHz 的频标间隔较宽, 幅度较大。在测试中, 如仪器内部 1MHz 和 10MHz 频标不能满足要求时, 可利用外接频标端口接入所需要的标准信号, 此时在屏幕上显示的便是外接标准信号的频标。

3. 波形显示部分

波形显示部分包括输入电路、Y 输出放大器、扫描信号发生器、示波管及其控制电路。输入电路对输入信号进行放大或衰减, 然后经 Y 输出放大器放大送示波管的垂直偏转板, 以显示信号的幅度。扫描信号送示波管的水平偏转板, 形成水平扫描。

实际扫频仪中扫描信号发生器是用电源变压器的次级绕组来代替的, 从该绕组取出 50Hz 的交流电压作为扫描信号, 将其送示波管水平偏转板进行水平扫描, 同时又送到扫频振荡器进行频率调制, 以保证扫描信号与扫频信号的同步。由于扫描信号与扫频信号是同步的, 所以扫描电压的非线性对频率特性曲线的显示没有影响。

知识 2.3 频率特性测试仪的使用

频率特性测试仪的型号有多种, 但使用方法基本相同, 下面以目前使用较多的 BT-3C 型频率特性测试仪为例, 说明其使用方法。BT-3C 型频率特性测试仪的外形如图 6-9 所示。

1. BT-3C 型频率特性测试仪的性能指标

BT-3C 型频率特性测试仪的主要性能指标如下。

(1) 中心频率: 在 1Hz ~ 300MHz 内可以任意调节。



图 6-9 BT-3C 型频率特性测试仪外形图

- (2) 扫频宽度：最大频偏 $\geq \pm 15\text{MHz}$ ，最小频偏 $\leq \pm 0.5\text{MHz}$ 。
- (3) 扫频非线性系数：小于 10%（扫频频偏在 $\pm 15\text{MHz}$ 内）。
- (4) 输出扫频信号电压：大于 0.5V（有效值）。
- (5) 输出阻抗： $75\Omega \pm 20\%$ 。
- (6) 寄生调幅系数：小于 7%（扫频频偏在 $\pm 15\text{MHz}$ 内）。
- (7) 频标信号：1MHz/10MHz、50MHz 和外接 3 种。
- (8) 检波探头性能：输入电容不大于 5pF，最大允许直流电压 300V。
- (9) 扫频信号衰减：粗衰减，10dB $\times 7$ 步进，细衰减，1dB $\times 9$ 步进。
- (10) 示波部分性能：垂直输入灵敏度大于 250mm/V。

2. BT-3C 型频率特性测试仪的面板

BT-3C 型频率特性测试仪的面板标示如图 6-10 所示，各开关旋钮的功能说明如下。

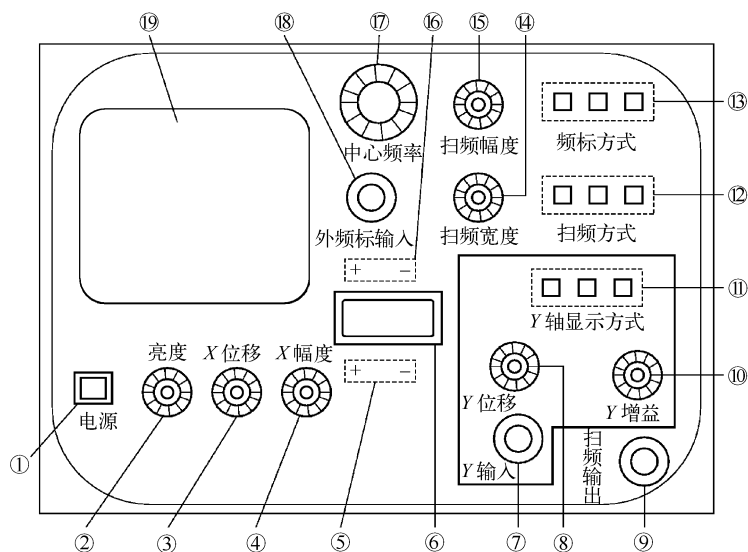


图 6-10 BT-3C 型频率特性测试仪面板图

- ① 电源开关 按下接通电源。
- ② 亮度调节 用于调节显示图形的亮度大小，顺时针旋转亮度增加。

- ③ X 位移旋钮 用于调节扫描线水平方向的位置。
- ④ X 幅度旋钮 用于调节扫描线长度。
- ⑤ 细衰减按键 从 $0 \sim 9\text{dB}$, 1dB 步进, “+” 增大衰减量, “-” 减小衰减量。
- ⑥ 衰减指示屏 用于指示衰减 dB 数。
- ⑦ Y 输入插口 检波后的信号由此端口输入, 经放大或衰减后显示在屏幕上。
- ⑧ Y 位移旋钮 用于调节图形垂直方向的位置。
- ⑨ 扫频输出插口 扫频信号由此端口输出, 送至被测电路。
- ⑩ Y 增益旋钮 用于调节图形垂直方向的幅度大小, 顺时针旋转幅度升高。
- ⑪ Y 轴显示方式按键 AC/DC 耦合键, 按下为 DC 方式; “ $\times 1$ ” / “ $\times 10$ ” 键, 按下为 $\times 10$ 挡; “+” / “-” 极性键, 按下为正极性显示。
- ⑫ 扫频方式按键 用于选择扫频方式, 分 “全扫”、“窄扫”、“点频” 共三挡, 按下选用。“全扫” 是扫描全部频率范围, “窄扫” 范围由扫频宽度调节, “点频” 是不扫描。
- ⑬ 频标方式按键 用于选择晶体振荡频率标记和外输入频率标记, 分 “ $10/1\text{MHz}$ ”、“ $50/10\text{MHz}$ ”、“外接” 共三挡, 按下选用。
- ⑭ 扫频宽度旋钮 用于在窄扫时对扫频宽度进行调节, 顺时针旋转扫频宽度增大。
- ⑮ 频标幅度旋钮 用于调节频率标记的高度, 顺时针旋转频标高度增加。
- ⑯ 粗衰减按键 从 $0 \sim 70\text{dB}$, 10dB 步进, “+” 增大衰减量, “-” 减小衰减量。
- ⑰ 中心频率调节旋钮 用于在窄扫时对中心频率进行调节, 全扫时无调节作用。
- ⑱ 外频标输入接口 接收外来信号作为特定频标。
- ⑲ 示波管屏幕 用于显示频率特性曲线的图形。

3. BT-3C 型频率特性测试仪使用前的检查

(1) 探头及电缆的使用

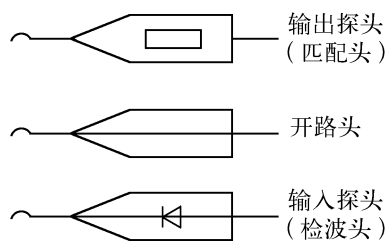


图 6-11 探头符号

扫频仪一般附有四种探头或电缆。即输入探头（检波头）、输入电缆和输出电缆（开路头）、输出探头（匹配头），探头符号如图 6-11 所示。

① 输入探头 当被测系统输出信号未经过检波电路时, 应采用带有检波器的输入探头与 Y 轴输入端连接。当被测系统输出信号已经过检波电路时, 则应采用输入电缆（开路头）与 Y 轴输入端连接。

② 输出探头 当被测系统输入端已经具有 75Ω 的特性阻抗时, 应采用输出电缆（开路头）将扫频电压输出端与被测系统连接。当被测系统输入端为高阻抗时, 为减小误差, 则应采用对地接有 75Ω 匹配电阻的匹配头将扫频电压输出端与被测系统连接。

(2) 频标的识别

① 零频标的识别 将中心频率调节旋至起始位置, 此时在屏幕中心位置会出现一个零频标, 即使将频标幅度旋钮关死、零频标也不会消失。

② 其他频标识别 认定零频标后, 先将频标选择置 $10/1\text{MHz}$ 处, 频标幅度调至较大, 此时屏幕上出现两种幅度不同的菱形频标, 其中幅度较大的频标表示 10MHz , 幅度较小的



频标表示 1MHz。然后再把频标选择置 50/10MHz，此时屏幕上出现幅度较大的频标表示 50MHz，幅度较小的频标表示 10MHz。

(3) 技术性能检查

① 扫频范围的检查 频标选择 50MHz，频标幅度调至适当位置。旋转“中心频率”旋钮时，对应于屏幕中心位置上扫频信号的中心频率应能在 1Hz ~ 300MHz 的范围内连续变化。

② 扫频频偏的检查 频标选择 50MHz，将“扫频宽度”旋钮由小旋至最大，频偏量应能在 1Hz ~ 300MHz 的范围内连续变化。

③ 寄生调幅系数的检查 将连接“扫频输出端”的电缆与连接 Y 轴输入端的检波探头对接，粗、细衰减均置于 0，Y 轴衰减置于 1，调节 Y 轴增益旋钮，使屏幕上出现高度适当的矩形方框，如图 6-12 所示。假设方框最大处的高度为 A 格，最小处的高度为 B 格，则寄生调幅系数 m 为

$$m = \frac{A - B}{A + B} \times 100\% \quad (6-2)$$

BT-3C 型扫频仪的频偏在 $\pm 15\text{MHz}$ 内时，寄生调幅系数应小于 7%。

④ 扫频非线性系数的检查 按上述③的连接，调节“频率偏移”旋钮使频偏在 $\pm 15\text{MHz}$ 以内，读出在中心频率 f_0 两边频偏量 Δf 相等的水平距离 A 和 B，如图 6-13 所示，则扫频非线性系数 γ 为

$$\gamma = \frac{A - B}{A + B} \times 100\% \quad (6-3)$$

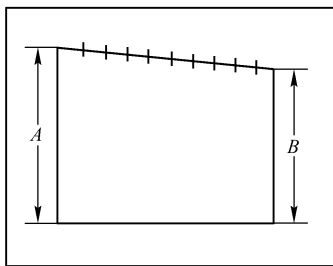


图 6-12 寄生调幅系数示意图

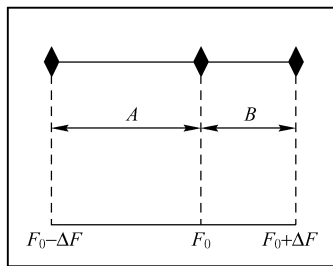


图 6-13 非线性系数示意图

BT-3C 型扫频仪的频偏在 $\pm 15\text{MHz}$ 内时，扫频非线性系数应小于 10%。

⑤ 扫频输出电压检查 将“扫频方式”按键置于“点频”位置，调节频率偏移为最小，将超高频毫伏表接至“扫频输出”端测量，整个频段内的输出电压应不小于 500mV。

4. BT-3C 型频率特性测试仪的测量使用方法

① 接入 220V 电源电压，按下电源开关，预热 15min，调节亮度旋钮以得到适当的辉度。在测量前先进行技术性能检查。

② 将扫频仪的扫频输出与被测系统的输入端用输出电缆连接，用检波探头将系统的输出信号检波后送入扫频仪的垂直输入端，再根据被测对象选定中心频率、扫频频偏与输出衰减等，则屏幕上应显示出被测电路的频率特性曲线，调节各有关旋钮，使曲线图形便于观测即可。

③ 对于输出端带有检波电路的被测系统，与 Y 轴输入端的连接应使用开路输入电缆；

当被测电路输出端带有直流电平时， Y 轴输入应选用 AC 耦合方式；当被测电路输入端带有直流电平时，应在扫频输出电缆上串接容量较小的隔直电容。

④ 当需要特殊频标时，可将“频标选择”置于外接，在“外接输入端”加入所需信号电压（应大于 50mV）。

⑤ 将“扫频方式”置于“点频”位置时，为不扫频，频偏为零，此时扫频仪可作为一种信号发生器使用。

⑥ 测量时，扫频输出电缆和检波探头的连接线应尽量短，切忌在检波头上加接导线，以免产生测量误差。

5. 测量应用举例

下面以测量调谐放大器的幅频特性为例，说明如何通过观察放大器的幅频特性曲线来测量其增益、带宽和 Q 值的方法。

在对仪器进行检查的基础上，根据前述使用方法，正确连接被测放大器，并对仪器作相应调整，使屏幕上显示出调谐放大器的幅频特性曲线，如图 6-14 所示。根据频标可以直接读出幅频特性曲线上相应点的频率值，根据显示的幅频特性曲线和仪器面板控制开关的位置可以对放大器增益进行定量测量。由此可得出放大器的频率特性参数。

(1) 测量增益

调节扫频仪的“ Y 轴增益”旋钮和“输出衰减”旋钮，使显示的曲线幅度接近满刻度，记下此时曲线高度 H （如 5 格）及“输出衰减”量 N_1 。然后去掉被测放大器，将检波探头与扫频输出电缆直接相连，此时显示的幅度必然下降，再次调节“输出衰减”旋钮（减小衰减），使屏幕上两根水平亮线的距离仍为 H ，记下此时的“输出衰减”量 N_2 。这样，被测放大器的增益为 $A = N_1 - N_2$ (dB)。

应当注意，在获得 N_1 读数之后，扫频仪的“ Y 轴增益”旋钮要保持不变，否则测量结果不准确。

(2) 测量带宽

利用扫频仪上的频标，可以很方便地确定被测放大器幅频特性曲线上各点的频率，由此可得出带宽 B 。在图 6-14 中，放大器的带宽为 $B = f_2 - f_1$ (Hz)。

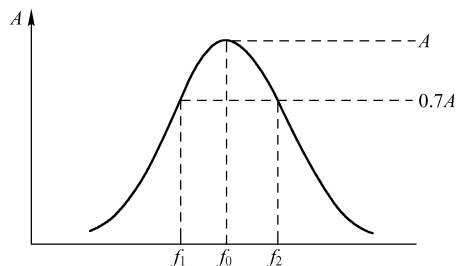


图 6-14 调谐放大器的幅频特性曲线

(3) 测量 Q 值

特性曲线中心频率为 f_0 ，则回路 Q 值为

$$Q = f_0 / (f_2 - f_1)。$$



任务3 仪器介绍——频谱分析仪

频谱分析仪,简称频谱仪,是用于显示输入信号的幅度(或功率)相对于频率分布的仪器。频谱仪一般用于分析重复波形的特性,因此在所分析的频率范围内重复扫描,就可显示信号的全部成分。就是将连续信号分解成各个正弦分量,并以 f/U 图形显示出来,它实质上相当于一台被校准于正弦波有效值的峰值响应的选频电压表。

由于频谱仪的测量功能较多,因此被广泛应用于广播、电视、通信、雷达、导航、电子对抗及各种电路的设计、制造和电子设备的维护、修理等方面。

知识 3.1 频谱分析仪的分类及用途

1. 频谱分析仪的分类方法

频谱分析仪按不同的特性,有不同的类型和不同的分类方法。

- (1) 按工作频率分,有低频频谱仪、射频频谱仪和微波频谱仪。
- (2) 按频带宽度分,有宽带频谱仪和窄带频谱仪。
- (3) 按扫频方式分,有扫射频式频谱仪和扫中式频谱仪。
- (4) 按分析方式分,有滤波式频谱仪和计算式频谱仪。
- (5) 按工作原理分,有实时频谱仪和扫描调谐频谱仪。

最后一种是最通行的分类方法,目前频谱仪的发展趋势是多功能化、智能化和自动化,充分利用计算机和微处理器的作用,实现仪器的多功能测量和自动操作。

2. 频谱分析仪的主要用途

(1) 信号参数的测量

频谱仪可以测量信号本身(即基波)及各次谐波的频率—幅度谱或功率谱,以及各频率分量之间的间隔。可对电信号的频率成分、调制度、调制失真、频偏、谐波失真、互调失真、信号带宽、干扰噪声等多种参数进行测量。

(2) 电子产品性能测试

频谱分析仪可显示信号中的各频率成分及幅度,在生产和检测中常用于测试分频器、倍频器、混频器、频率合成器、滤波器、放大器及各种电子产品的性能,包括增益、衰减、频率特性、谐波失真、相位噪声、杂波辐射等多种参数的测量,因此,频谱分析仪是无线电通信设备整机检测的重要仪器。

(3) 信号的仿真测量

对于声音信号来说,通常说的“音色”是对频谱而言的,音色如何是由其谐波成分决定。各种乐器或歌唱家的音色可用频谱来鉴别。在电子琴的制作和调试过程中,使用频谱分析仪,通过与被仿乐器的频谱做精确的比对,可提高电子琴的仿真效果。还可通过频谱分析仪的协助来实现语言的仿真。

(4) 电磁干扰的测量

由于频谱分析仪覆盖频带宽, 配接天线可测量空间场强、电磁干扰等。可对无线电通信电磁环境中的噪声电平、干扰大小与分布、占用带宽等进行测试, 因此频谱分析仪是对电磁干扰的测试、诊断和故障检修中用途最广的仪器。

知识 3.2 频谱分析仪的工作原理

不同类型的频谱仪, 其性能特点、结构组成和工作原理各不相同。

1. 实时频谱仪

实时频谱仪能同时显示规定频率范围内的所有频率分量, 而且保持了各个信号间的时间关系 (相位信息), 它不仅能分析周期信号、随机信号, 而且能分析瞬时信号。实时频谱仪又分为多通道滤波式频谱仪和快速傅里叶变换式频谱仪两类。

(1) 多通道滤波式频谱仪

多通道滤波式频谱仪的组成原理如图 6-15 所示, 输入信号同时送到每个带通滤波器, 带通滤波器的输出表示输入信号中被该滤波器通带内所允许通过的那一部分能量, 因此显示器上显示的是各带通滤波器通带内的信号的合成信号。由于受滤波器数量及带宽的限制, 这类频谱仪主要工作在音频范围, 其缺点是造价高, 体积大。

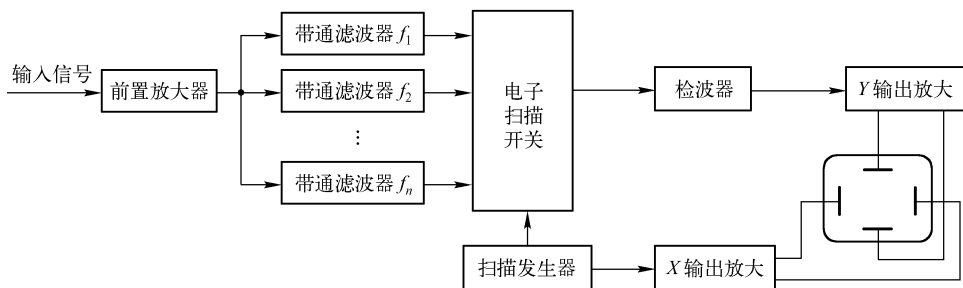


图 6-15 多通道滤波式频谱仪的组成框图

(2) 快速傅里叶变换式频谱仪

快速傅里叶变换式频谱仪的组成原理如图 6-16 所示, 其核心是以对函数进行傅里叶变换的数学计算为基础, 因此需要使用高速计算机进行数字功率谱的计算。根据采样定理, 即最低采样速率应该大于或等于被采样信号的最高频率分量的两倍, 由于受计算机工作速度的限制, 快速傅里叶变换式频谱仪一般工作频在低频段范围内。



图 6-16 快速傅里叶变换式频谱仪组成框图

2. 扫描调谐式频谱仪

扫描调谐式频谱仪对输入信号按时间顺序进行扫描调谐, 因此只能分析在规定时间内频谱几乎不变化的周期性重复信号。这种频谱仪有很宽的工作频率范围, 从 DC 可达几百



MHz。常用的扫描调谐式频谱仪又分为扫描射频式频谱仪和超外差式频谱仪两类。

(1) 扫描射频式频谱仪

扫描射频式频谱仪的组成原理如图 6-17 所示, 利用中心频率可电调的带通滤波器来调谐和分辨输入信号。但这种类型的频谱仪分辨率、灵敏度等指标比较差, 所以已开发的此类产品不多。

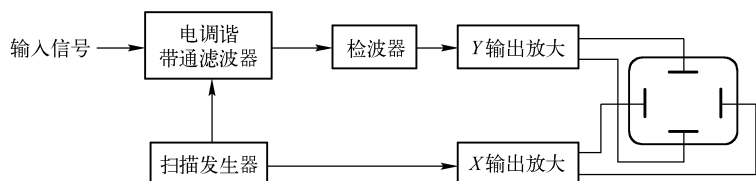


图 6-17 扫描射频式频谱仪组成框图

(2) 超外差式频谱仪

目前产品品种和数量最多、应用最广泛的是扫描第一本振的超外差式频谱仪, 其原理如图 6-18 所示。

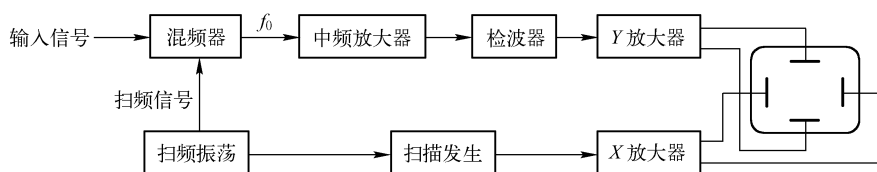


图 6-18 超外差式频谱仪原理框图

超外差式频谱仪实质上是一种具有扫频和窄带宽滤波功能的超外差式接收机, 与其他超外差式接收机原理相似, 只是用扫频振荡器作为本机振荡器, 它的中频电路相当于频带很窄的带通滤波器, 按外差方式选择所需的频率分量。这样, 当扫频振荡器的频率在一定范围内扫动时, 与输入信号中的各个频率分量在混频器中产生差频 (即中频), 使输入信号的各个频率分量依次落入窄带滤波器的通带内, 被滤波器选出并经检波后加到示波器的垂直偏转系统, 则光点的垂直偏转大小正比于该频率分量的幅值。由于示波器的水平扫描电压就是调制扫频振荡器的调制电压, 所以水平轴就变成频率轴, 这样在屏幕上将显示出输入信号的频谱图。

超外差式频谱仪具有几 kHz ~ 几百 GHz 的极宽的频率分析范围、从几 Hz ~ 几 MHz 的分辨力带宽、80dB 以上的动态范围等高性能指标。

知识 3.3 频谱分析仪的性能指标

频谱分析仪的主要性能指标有以下一些。

(1) 有效频率范围 (中心频率范围)

有效频率范围指规定仪器特性的频率范围, 以 Hz 表示该范围的上限和下限。这里的频率是指中心频率, 即位于显示频谱宽度中心的频率。

(2) 分辨力带宽 (分辨力)

分辨力带宽指分辨频谱中两个相邻分量之间的最小谱线间隔, 单位是 Hz。它表示频谱仪能够把两个彼此靠得很近的等幅信号在规定点处分辨开来的能力。在频谱仪屏幕上看到的被测信号的谱线实际是一个窄带滤波器的动态幅频特性图形 (类似钟形曲线), 因此分辨力取决于窄带滤波器幅频特性的带宽。定义这个窄带滤波器幅频特性的 3dB 带宽为频谱仪的分辨力带宽。

可以看出, 若带宽过宽, 以致被测信号中的两条谱线有可能同时落入滤波器的通带内, 则频谱仪就没有能力分开这两个频率分量, 如图 6-19 所示。

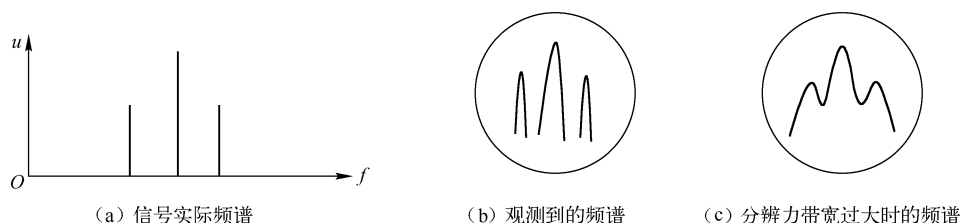


图 6-19 分辨力对频谱观测的影响

由于窄带滤波器的幅频特性曲线形状与扫频速度有关, 故分辨力也与扫频速度有关。当扫频速度为零时, 静态幅频特性曲线的 3dB 带宽为静态分辨力。在扫频工作时 (扫频速度不为零), 动态幅频特性曲线的 3dB 带宽为动态分辨力。动态分辨力低于静态分辨力, 而且扫频速度越快, 动态分辨力越低 (带宽越宽)。

(3) 灵敏度

灵敏度指在给定分辨力带宽、显示方式和其他影响因素下, 频谱仪显示最小信号电平的能力, 一般将显示幅度为满刻度时的输入信号电平值, 称为频谱仪的灵敏度。以 dBm、dBu、dBV、V 等单位表示。

频谱仪的灵敏度取决于仪器的内噪声。当测量小信号时, 信号谱线是显示在噪声频谱之上的。为了易于从噪声频谱中看清信号谱线, 一般信号电平应比内部噪声电平高 10dB。另外, 灵敏度还与扫频速度有关, 扫频速度越快, 动态幅频特性峰值越低, 导致灵敏度越低, 同时还会产生幅值误差。

(4) 动态范围

动态范围指频谱仪能以规定的准确度测量同时出现在输入端的两个信号电平之间的最大差值。是表征频谱仪显示大信号和小信号的真实频谱的能力。动态范围的上限受非线性失真的制约。频谱仪的幅值显示方式有两种: 线性显示和对数显示。对数显示的优点是在有限的屏幕有效高度范围内, 可获得较大的动态范围。频谱仪的动态范围一般在 60dB 以上, 有的甚至可达到 100dB。

(5) 扫频宽度 (分析谱宽)

扫频宽度指频谱仪在一次分析过程中 (即一个扫描正程) 所显示的频率范围, 为了观察被测信号频谱的全貌, 需要的扫频宽度较宽; 当分析信号频谱中的细节时, 则需要窄带扫频, 频谱仪的扫频宽度是可调的。

每厘米 (或每格) 相对应的扫频宽度称为频宽因数。完成一次频谱分析所需的时间称



为分析时间,即本机振荡器的频率扫完整个扫频宽度所需的时间(扫描正程时间)。扫频宽度与分析时间之比称为扫频速度。扫频宽度通常又分为以下三种模式。

- ① 全扫频,频谱仪一次扫描它的全部有效频率范围。
- ② 窄扫频,频谱仪一次只扫描一个规定的频率范围,可以进行调节。
- ③ 零扫频,扫频宽度为零,此时频谱仪不扫频,相当于调谐接收机。

知识 3.4 频谱分析仪的选择和使用

目前频谱分析仪的种类繁多,实现的功能也有所不同,而且扫频宽度、分析时间、频带宽度等参数都是可调的,而频谱仪的动态分辨力、灵敏度和扫频速度又是相互影响的,如何选择合适的仪器型号、设置可调参数值,是正确使用频谱仪的关键。

(1) 频谱仪型号的选择

应根据测量对象和测量目的来选择仪器的型号。例如测量全球移动通信系统(GSM)和时分多址(TDMA)信号时,应选择具有特殊的时域测量能力的、具有零频宽操作功能,还能进行时间门限组合、进行上升/下降沿脉冲串测量的仪器。

(2) 扫频宽度的选择

应根据被测信号的频谱宽度来选择扫频宽度。例如,分析一个调幅波,扫频宽度应大于调制信号频率的二倍;若需要观测是否存在一次谐波的调制边带,则扫频宽度应大于调制信号频率的四倍。

(3) 分辨力的选择

扫频宽度的选择应与静态分辨力 B_q 相适应。一般情况下,宽带扫频选择静态分辨力带宽 B_q 为150Hz,而窄带扫频选择 B_q 为6Hz。

(4) 扫频速度的选择

当扫频宽度与静态分辨力 B_q 选定后,扫频速度 v 的选择是以获得较高的动态分辨力 B_d 为准则。同时还应合理处理扫频速度与分析时间的矛盾,因为当扫频宽度一定,扫频速度的选择即是分析时间的选择。分析时间越长,扫频速度越小, B_d 越接近 B_q 。一般选择的准则是

$$v \leq B_q^{-2} \quad (6-4)$$

式中, v 为扫频速度,单位Hz/s; B_q 为静态分辨力,单位Hz。

现代频谱仪普遍采用高性能的数字处理器芯片,充分利用计算机和微处理器的作用,实现仪器的自动操作。使频谱仪能够根据被测信号的特点,自动设置最佳分析带宽、分辨力、扫描时间等参数,无须人工调节,不仅使得测量过程简单化,而且还能够获得较高的准确度和分辨力。

知识 3.5 频谱分析仪的使用

频谱分析仪的型号很多,适用范围各不相同,但使用方法基本相同,下面以QF-4031型扫频外差式频谱分析仪为例,说明频谱分析仪的使用。该仪器的外形如图6-20所示。



图 6-20 QF-4031 型频谱分析仪的外形图

QF-4031 型频谱分析仪具有频谱范围宽, 频率分辨率高, 动态范围大, 频率响应好等特点。可用于无线电信号分析和测量。

1. QF-4031 型频谱分析仪的主要技术指标

(1) 频率范围: 50Hz ~ 1700MHz, 分为频段 I (50Hz ~ 1700kHz) 和频段 II (10kHz ~ 1700MHz)。

(2) 频率指示: 用 4 位 LED 数字显示器指示扫频中心频率。

(3) 扫频宽度: 20Hz/div ~ 100MHz/div (按 1、2、5 分挡) 或零扫。

(4) 中频带宽: 30Hz ~ 300kHz (按 1、3 分挡)。

(5) 幅度显示范围: 频段 I 为 (-130 ~ +20) dBm, 频段 II 为 (-122 ~ +20) dBm。

(6) 对数显示精度: $\pm 1.5\text{dB}/72\text{dB}$, $\pm 0.3\text{dB}/8\text{dB}$, $\pm 0.15\text{dB}/1\text{dB}$ 。

(7) 扫描时间: 0.1ms/div ~ 10s/div (按 1、2、5 分挡) 或手扫。

(8) 扫描触发源: 包括自动、电源、视频、外部、单次五种。

(9) 内部校准信号: 50Hz $\pm 0.01\%$, 50MHz $\pm 0.01\%$ 。

2. 使用测试实例

下面通过两个实例介绍频谱分析仪在测量杂波辐射方面的应用。

(1) 测量无线电台发射机的杂波辐射

杂波辐射分为传导型和辐射型两种。其中辐射型的杂波辐射是指用标准信号作为调制信号, 发射机除载波和由调制信号决定的边带以外离散频率的辐射。它必然对接收机, 尤其对于接收带宽过大的接收机造成非常严重的干扰。

按图 6-21 所示连接测量电路。发射机先在不调制状态下工作, 频谱仪的中心频率调整在发射机载频频率上, 使载波峰值电平在屏幕上显示于 0dB 线上。调节频谱仪的频率旋钮在 100kHz ~ 1000MHz 或其 4 倍载频的范围内变化, 记下各杂波辐射电平。然后在发射机上加上调制信号, 重复以上测量过程。

发射机技术指标: 当载波功率大于 25W 时, 离散频率的杂波辐射功率比载波功率电平小于 70dB, 当载波功率小于或等于 25W 时, 离散频率的辐射功率电平应不大于 2.5 μ W。



(2) 测量接收机的杂波辐射。接收机的杂波辐射是指由接收机引起的辐射。杂波辐射的电平应包括:

- ① “天线辐射”，即在天线端的功率电平；
- ② “机箱辐射”，即由机箱和设备结构屏蔽不良引起的辐射。

按图 6-22 所示连接测量电路。合上接收机电源，先将开关 S 置于“1”，用频谱仪寻找 100kHz ~ 2GHz 以内的任何杂波辐射分量。再将开关置于“2”，用信号发生器输出模拟杂波辐射分量的信号，以确定其杂波辐射分量的电平值。

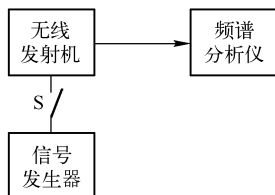


图 6-21 发射机的杂波辐射测量

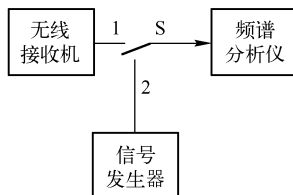


图 6-22 接收机的杂波辐射测量

在测量“机箱辐射”时，应将被测接收机置于屏蔽室内或无辐射的场所。接收机的技术指标：在规定频率范围内，任何杂波辐射分量的功率均不超过 2nW ($2 \times 10^{-9} \text{W}$)。

任务 4 仪器介绍——谐波失真度测试仪

我们都希望放大电路能真实地将原信号加以放大，但实际上通过放大电路后的输出信号往往与输入信号并不完全相同，即产生了信号的失真。信号失真的大小由失真度来表示，可使用失真度测量仪进行测量。

知识 4.1 失真度的定义及测量方法

由于电路特性的非线性，当信号通过放大电路时，会使输出信号中产生输入信号中所没有的新的频率成分，当输入信号为正弦波时，输出信号会成为一非正弦波，而一个非正弦波可看成是基波、二次谐波和一系列高次谐波组成，即信号产生谐波失真，又称非线性失真。另外当输入非正弦波时，除了产生谐波之外，各频率之间还会发生交互调制，产生相加和相减的频率成分。非线性失真的程度常用非线性失真系数即谐波失真度来表示。

1. 谐波失真度的定义

谐波失真度的测量方法有多种，如基波抑制法、交互互调法、白噪声法等，不同的测量方法，谐波失真度的定义也不同，低频信号失真度的测量通常采用基波抑制法。

基波抑制法谐波失真度的定义为：在纯电阻负载上，全部谐波电压（或电流）有效值与基波电压（或电流）有效值之比，即

$$D_0 = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2}}{U_1} \times 100\% \quad (6-5)$$

式中, U_1 为基波电压有效值; U_2, U_3, \dots, U_n 为各次谐波电压有效值; D_0 称为失真度。

2. 谐波失真度的测量

用基波抑制法测量信号的失真度时, 必须先将被测信号中基波分量滤除, 测出其谐波分量的有效值, 还要测出基波分量的有效值。由于测量基波电压有效值比较困难, 谐波失真度的测量通常是测量谐波电压的总有效值与被测信号总有效值之比 D 。即

$$D = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}} \times 100\% \quad (6-6)$$

D 称为失真度测量值, 而 D_0 称为定义值。 D_0 与 D 的关系为

$$D_0 = \frac{D}{\sqrt{1 - D^2}} \quad (6-7)$$

当失真度小于 30% 时, 可近似认为 $D_0 \approx D$ 。一般信号失真度都小于 10%, 所以用 D_0 代替 D 具有足够的准确度。采用这种测量方法, 电路结构简单、工作可靠、操作方便。目前谐波失真度测量仪, 绝大部分都采用这种测量方法。

在不同情况下, 不同的电路或产品对谐波失真度的要求是不同的, 如对一般语音设备要求失真度小于 1%, 对正弦信号发生器则要求失真度小于 0.05%。

知识 4.2 失真度测量仪的组成原理

采用基波抑制法的失真度测量仪是由输入电路、基波抑制网络和有效值电压表组成, 基本组成框图如图 6-23 所示。

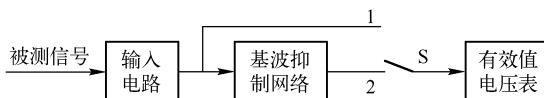


图 6-23 失真度测量仪的组成框图

谐波失真度测量原理如下: 测量过程分两次完成, 首先将开关 S 放在 “1” 的位置, 测量的结果是被测信号电压的总有效值。适当调节输入衰减器, 使电压表指示为规定电压值, 该电压值与电压表指示的失真度 100% 相对应, 这一过程称为校准。然后将开关置于 “2” 的位置, 调整基波抑制网络的频率, 使电压表指示值为最小, 这时基波分量受到最大的衰减, 测量结果是各次谐波电压的总有效值, 两次读数之比即为非线性失真度。这时电表的指示值就是失真度测量值 D 。这样, 失真度百分数可直接由电压刻度上读出。

基波抑制电路通常由文氏电桥滤波器组成, 这种电路具有结构简单、频率调节方便和频率特性尖锐等特点, 在失真度测量仪中得到了广泛应用。一个理想的基波抑制电路应能完全抑制基波, 同时不使二次及二次以上的谐波受衰减, 在实际测量中就会由于基波抑制特性不理想而引入一定的测量误差。

测量信号源的失真度时, 直接将信号源的输出信号连接到失真度测量仪进行测量, 测量电路的失真度时, 需要使用一个低失真度的正弦信号发生器, 输出一个纯净正弦波信号, 作为被测电路的输入信号, 加到被测电路的输入端, 在电路输出端用失真度测量仪测量其输出



信号的谐波失真度。

知识 4.3 失真度测量仪的使用

失真度测量仪型号有多种,但是它们的基本使用方法相似。下面以应用十分广泛的 BS-1 型失真度测量仪为例,说明其使用方法。BS-1 型失真度测量仪的外形如图 6-24 所示。



图 6-24 BS-1 型失真度测量仪外形图

1. BS-1 型失真度测量仪的主要技术性能

BS-1 型失真度测量仪是测量音频放大器谐波失真度的常用仪器,还可以作为单独的平衡式或不平衡式音频电压表使用,其主要技术性能如下。

(1) 失真度测量

- ① 基波频率范围:不平衡输入时 $2\text{Hz} \sim 200\text{kHz}$ (连续可调),平衡输入时 $20\text{Hz} \sim 40\text{kHz}$ 。
- ② 失真度测量范围: $0.1\% \sim 100\%$,分 7 挡,准确度 $\pm 5\%$ 。
- ③ 输入电压范围:不平衡输入时 $30\text{mV} \sim 300\text{V}$,分 5 挡衰减, $0 \sim 50\text{dB}$;平衡输入时 $30\text{mV} \sim 10\text{V}$,分 3 挡衰减, $0 \sim 20\text{dB}$ 。

(2) 电压测量

- ① 电压测量范围:不平衡输入时 $30\text{mV} \sim 300\text{V}$,分 5 挡衰减,平衡输入时 $30\text{mV} \sim 10\text{V}$,分 3 挡衰减。准确度 $\pm 0.5\%$ 。
- ② 电平测量范围: $0 \sim -60\text{dB}$,分 7 挡。
- ③ 输入频率范围:不平衡输入时 $2\text{Hz} \sim 200\text{kHz}$,平衡输入时 $20\text{Hz} \sim 40\text{kHz}$ 。
- ④ 输入阻抗:不平衡输入时,大于 $500\text{k}\Omega$,平衡输入时为 $600\Omega \pm 3\%$ 或 $10\text{k}\Omega \pm 10\%$ 。

2. BS-1 型失真度测量仪的结构组成

BS-1 型失真度测量仪的电路组成框图如图 6-24 所示。其中不平衡衰减器、平衡衰减器、平衡变压器和射极跟随器组成了输入级,通过转换开关 K_1 的切换能使仪器工作在平衡信号输入和不平衡信号输入两种状态,且平衡衰减器的衰减量为 $0 \sim 20\text{dB}$,不平衡衰减器的衰减量为 $0 \sim 50\text{dB}$ 。该仪器的基波抑制电路由文氏电桥滤波器和放大器 (I) 组成。这种电路具有结构简单、频率调节方便和频率特性尖锐等特点。

为了测量输入信号电压和各次谐波电压的总有效值，指示器应具有高输入阻抗及高灵敏度，图 6-25 中的放大器 (II)、检波器和表头构成了放大—检波式电子电压表，量程由分压器多挡开关 K_2 控制。通过射极输出器还可外接示波器，对信号波形进行观测。

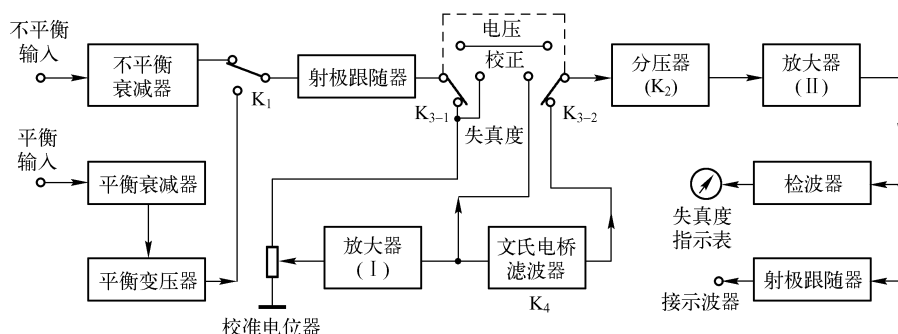


图 6-25 BS-1 型失真度测量仪原理框图

3. BS-1 型失真度测量仪的面板

BS-1 型失真度测量仪的面板标示如图 6-26 所示，各开关旋钮的功能说明如下。

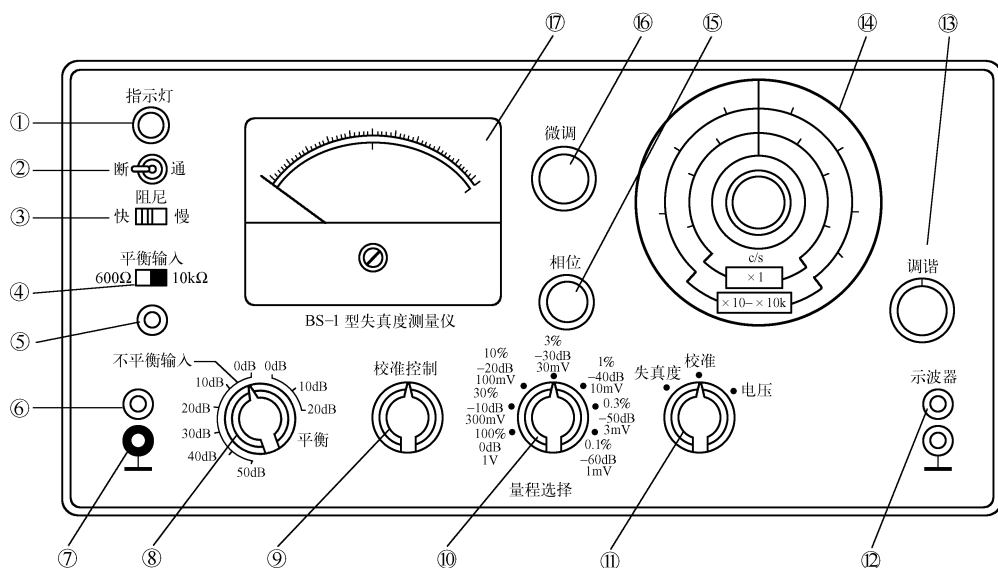


图 6-26 BS-1 型失真度测量仪面板标示图

- ① 电源指示灯 用于电源指示；
- ② 电源开关 打开电源开关，指示灯亮，仪器开始工作；
- ③ 阻尼开关 用于改变表头阻尼，分快、慢两挡，当被测电压频率在 $2 \sim 10\text{Hz}$ 时，表针晃动较大，此时可使用“阻尼”开关慢挡，其他情况下，应使用快挡；
- ④ 平衡输入阻抗转换 分 600Ω 和 $10\text{k}\Omega$ 两挡；
- ⑤ 平衡输入插口 平衡输入信号由此插口输入；



⑥ 不平衡输入插口 当测量选择开关置于“电压”、“校准”、“失真度”挡时,被测信号(不对称信号)通过仪器配备的不平衡输入电缆由此插口输入;

⑦ 接地接线柱 为仪器接地点,与仪器的外壳相连,使用时应接地,以减小电磁干扰。

⑧ 输入衰减 测量时对输入信号进行衰减。不平衡输入时 $30\text{mV} \sim 300\text{V}$, 5 挡衰减,平衡输入时 $30\text{mV} \sim 10\text{V}$, 3 挡衰减;

⑨ 校准控制 用于进行失真度测量前的校准,调节校准控制旋钮,在 1V 挡,使电表指示于满度(即 100%);

⑩ 量程选择开关 有 7 挡。测量时根据被测信号电压的大小选择相应的挡级;

⑪ 测量选择开关 有“电压”、“校准”、“失真度”3 挡位置。当开关置于“电压”挡时,仪器作为电压表使用;当开关置于“校准”挡时,仪器处于失真度测量前的校准状态;当开关置于“失真度”挡时,仪器可进行失真度测量;

⑫ 示波器插孔 通过该插孔外接示波器,用来同时监视被测信号波形,以及总谐波信号波形,以判别波形失真性质;

⑬ 频率调谐 失真度测量时,用于调整频率;

⑭ 频率指示盘 失真度测量时,用于指示频率;

⑮ 相位调节 失真度测量时,用于相位调节;

⑯ 频率微调 失真度测量时,用于频率微调;

⑰ 失真度指示表 表盘上有 3 条刻度,其中 $0 \sim 1$ 和 $0 \sim 3$ 是电压和失真度读数刻度线; $-20 \sim +20$ 是分贝读数刻度线,这条刻度是按 600Ω 阻抗时刻度的。

4. BS-1 型失真度测量仪的使用

(1) 准备工作

① 在使用前先将测量选择开关放在“电压”位置,量程选择开关置于“100%、1V、0dB”挡,然后,接通电源,指示灯亮,表明仪器开始工作,将仪器预热 $15 \sim 30\text{min}$,再按下列顺序检查仪器噪声。

② 将不平衡输入端短路,测量选择开关放在“电压”挡,量程选择开关放在“1mV、0.1%、-60dB”挡,此时电压表指示值应不超过 0.02mV ,否则应调整仪器背后的电压表增益调节电位器,使指示值合格。

(2) 失真度测量

① 做好准备工作,接通电源,根据被测信号是平衡电压还是不平衡电压,由不同端口接入,调节量程选择开关使表头有较大幅度的指示。

② 将测量选择开关转至“校准”处,并调节“校准电位器”旋钮,使表头指针偏转至满刻度(100%处)。然后,再把此开关置于“失真度”位置。

③ 将频段开关置于被测信号频率所在的波段,接着反复调节“调谐”、“微调”、“相位”三个旋钮,直至表头的指示值最小。在以上调节过程中还要相应地减小分压器的量程。

④ 根据量程选择开关位置及表头指针所指示的读数即可得到失真度的大小。

⑤ 然后将测量选择开关放回“校准”位置,电压表指示仍应在 100% 位置,说明测量正确,否则要重新按上述步骤复测。

(3) 电压测量

测量电压时, 将测量选择开关置于“电压”位置, 此时失真度测量仪就可当作电压表使用。接通电源后, 应使表针稳定几分钟后使用, 然后依次改变输入衰减器和量程选择开关位置, 即可从表头上读出被测电压值。(被测电压 = 电压表指示值 × 量程 × 衰减倍数)

分贝值的测量和读数方法参见项目 2 中电平测量相关内容。

(4) 使用注意事项

① 失真度测量仪工作时, 应与被测设备及其他仪器有统一的接地线, 以防止干扰引起测量误差。

② 无论电压测量或失真度测量, 都要估计被测信号幅度, 将量程选择开关放在较大位置, 以防止信号幅度过强使表头过载而损坏。测试结束, 应将此开关放回 100% 挡位置。

任务 5 应用实训——频域测量实训

实训 5.1 调谐放大器谐振曲线测试实训

1. 实训目的

- (1) 学会频率特性测试仪的操作使用方法;
- (2) 掌握调谐放大器谐振曲线的测试技能。

2. 实训设备

BT-3C 型频率特性测试仪、检波探头和输出电缆各 1 根、调谐放大器、直流稳压电源。

3. 实训内容

用扫频仪测试和调整中频放大器的谐振曲线, 测试连接图如图 6-27 所示。

将扫频仪射频输出接至电路输入端, 电路输出端用检波探头接至扫频仪输入端。扫频仪输出衰减置于 20 ~ 30dB 挡位, 应根据实际情况来选择合适挡位。观察回路的谐振曲线, 调整回路谐振微调电容 C_T , 使 $f_0 = 10.5\text{MHz}$, 谐振曲线如图 6-28 所示。

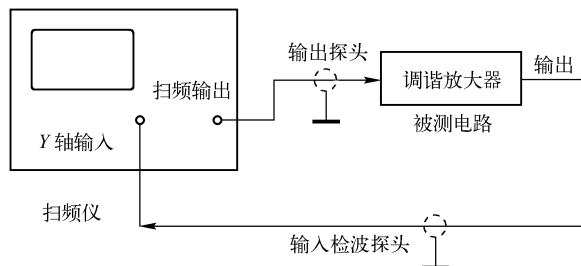


图 6-27 调谐放大器谐振曲线测试连接图

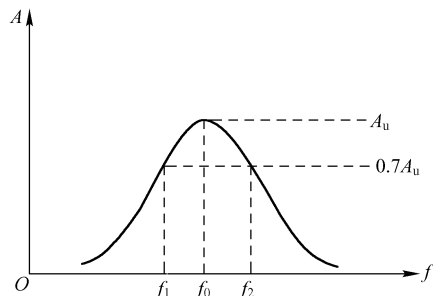


图 6-28 调谐放大器谐振曲线



画出中频放大器的谐振曲线，并计算放大器的增益、通频带 B 和 Q 值填入表 6-1 中。

表 6-1 调谐放大器谐振曲线测试数据

测量参数	f_1	f_2	f_0	A	B	Q
测量值						

实训 5.2 鉴频器鉴频曲线测试实训

1. 实训目的

- (1) 学会频率特性测试仪的使用方法；
- (2) 掌握鉴频器鉴频曲线的测量技能。

2. 实训设备

频率特性测试仪、开路探头、输出电缆、相位鉴频器、直流稳压电源。

3. 实训内容

用频率特性测试仪测试和调整鉴频器的鉴频特 S 型曲线。测试连接图如图 6-29 所示。

将频率特性测试仪中心频率调至 10.5MHz，扫频宽度 2MHz 左右，输入探头使用双夹子开路电缆线，接至鉴频器输出端，即可看到 S 型曲线，如图 6-30 所示。如曲线不理想，可适当调节相应的微调电容，使 10.5MHz 位于曲线中心点，两边频带对称，电压幅度上下对称。频率不对称度 γ_f 和幅度不对称度 γ_v 可分别按下两式计算。

$$\gamma_f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \quad \gamma_v = \frac{V_m - V_n}{V_m + V_n}$$

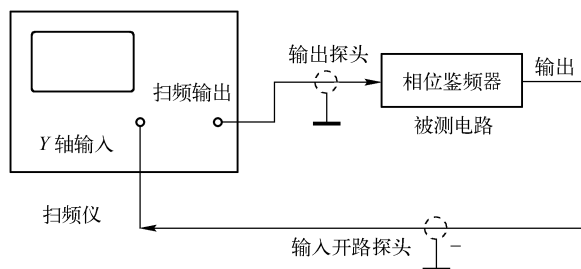


图 6-29 鉴频器鉴频曲线测试连接图

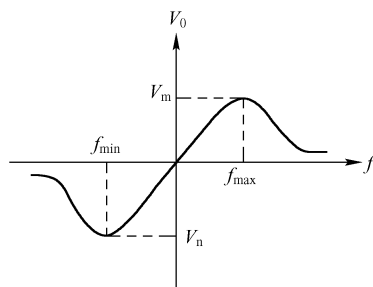


图 6-30 鉴频器鉴频特性曲线

曲线调整后，将二峰点频率 f_{\min} 、 f_{\max} 和二峰点电压 V_n 、 V_m （格数），以及频率不对称度 γ_f 和幅度不对称度 γ_v 的计算值填入表 6-2 中。

表 6-2 鉴频器鉴频特性测试计算数据

测量参数	f_{\min}	f_{\max}	γ_f	V_n	V_m	γ_v
测量计算值						

实训 5.3 功率放大器失真度测试实训

1. 实训目的

- (1) 学会失真度测量仪的使用方法；
- (2) 掌握放大器失真度的测试技能。

2. 实训设备

失真度测量仪、低频信号发生器、5W 音频功率放大器、直流稳压电源。

3. 实训内容

用失真度测量仪测试音频功率放大器的谐波失真度，测试连接图如图 6-31 所示。



图 6-31 音频功率放大器失真度测试连接图

(1) 测试工作频率不同时的谐波失真度

固定低频信号发生器的输出电压不变，逐点改变输出信号频率，保持音频功率放大器额定输出功率不变，测试工作频率不同时的谐波失真度，一般音频功率放大器的谐波失真度在 400 ~ 1000Hz 范围内应不大于 5%，将测试计算数据填入表 6-3 中。

表 6-3 工作频率不同时的谐波失真度

信号频率 (Hz)	50	100	200	400	1k	2k	5k	10k	20k
失真度 (%)									

(2) 测试输出功率不同时的谐波失真度

固定低频信号发生器输出信号的频率为 1kHz，调节其输出电压，改变音频功率放大器的输出功率，测试输出功率不同时的谐波失真度，并计算最大不失真输出功率（失真度不大于 5% 时的输出功率），输出功率 $P_o = U_o^2 / R_L$ ，将测试计算数据填入表 6-4 中。

表 6-4 输出功率不同时的谐波失真度

输出功率 (W)	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0
失真度 (%)									

本项目小结

1. 对信号和系统的特性进行分析，可在时域和频域两个方面进行，时域分析和频域分



析各有特点。时域测量分析与频域测量分析虽然可以用来反映同一信号的特性,但是它们分析的角度不同,针对不同的实际情况,时域测量和频域测量各有其具体的适用场合,两者是相辅相成、互为补充的。

2. 频率特性测试仪又称为扫频仪,是一种能够直观测量电路或系统幅频特性的仪器。扫频仪主要由扫频信号发生器、波形显示器和频标信号发生器组成。扫频仪是根据扫频测量法构成,扫频测量是动态测量,具有简单、直观、方便、快速等优点,并且在测量的同时还可以进行调试,便于实现频率特性测量的自动化。

3. 频谱仪是对信号的频谱成分进行分析测量的仪器。频谱仪不仅能够分析信号的频率组成以及各频率分量的幅度大小,还可以测试调制度、谐波失真、干扰噪声等多种参数进行测量,其测量功能较多,应用广泛。按其工作原理可分为顺序滤波式频谱仪和扫频外差式频谱仪两大类,目前使用最多的是扫频外差式频谱仪。在实际使用时应根据测量参数的要求,选择不同性能的频谱仪。

4. 谐波失真度的测量方法有多种,如基波抑制法、交互互调法、白噪声法等,不同的测量方法,谐波失真度的定义也不同。低频信号失真度的测量常采用基波抑制法。失真度测量仪由输入电路、基波抑制网络和有效值电压表组成。测量电路的失真度时,需要使用一个低失真度的正弦信号发生器,输出一个纯净正弦波信号,加到被测电路的输入端,在其输出端用失真度测量仪测量其输出信号的谐波失真度。

项目6 思考题

1. 频域测量与时域测量有哪些区别? 各有什么特点?
2. 频域测量的内容有哪些? 常用频域测量仪器有哪几种类型?
3. 什么是点频测量和扫频测量? 扫频测量有什么优点?
4. 频率特性测试仪由哪几部分组成? 各部分作用是什么?
5. 频率特性测试仪可用于测量哪些参数?
6. 频率特性测试仪的探头有哪些? 如何正确使用?
7. 频谱分析仪如何分类? 常用有哪几种类型?
8. 频谱分析仪的技术指标有哪些? 它可用于测量哪些参数?
9. 简述失真度的定义和测量原理。
10. 失真度测量仪由哪几部分电路组成? 它可用于哪些方面的测量?



项目 7 元器件测量仪器及应用



本项目任务目标

1. 学习元器件测量的基本知识：应了解电子元器件的分类和基本参数，电子元器件测量仪器的主要类型；
2. 学习万用电桥的相关知识：应了解电桥的分类及平衡条件、万用电桥的组成及工作原理，掌握万用电桥的使用方法；
3. 学习高频 Q 表的相关知识：应了解谐振测量法的基本原理、高频 Q 表的组成及工作原理，掌握高频 Q 表的使用方法；
4. 学习半导体管特性图示仪的相关知识：应了解半导体管特性图示仪的组成及工作原理，掌握其使用方法；
5. 进行电子元器件测量实训：通过训练掌握测量各种低频电路元件、高频电路元件和半导体器件的基本技能。

任务 1 知识引领——元器件测量基本知识

电子产品是由各种不同的电子元器件构成，电子元器件的质量直接影响电子产品的性能与寿命，使用前必须进行筛选。因此，掌握电子元器件的测量方法，对于做好电子产品的设计、生产、使用或维护，都是十分重要的。

知识 1.1 电子元器件的分类及参数

1. 电子元器件的分类

电子元器件可分为无源电子元器件（又称为元件）和有源电子元器件（又称为器件）。

(1) 无源元件

无源元件主要包括电阻器、电容器、电感器等电路元件。

(2) 有源器件

有源器件主要是指各种半导体器件。

① 半导体分立器件 包括半导体二极管、半导体三极管、场效应管、晶闸管等；



② 半导体集成电路 包括运算放大器、集成稳压器、数字逻辑电路、半导体存储器、微处理器、可编程器件、专用集成电路等。

2. 电子元件的主要参数

电子元件的主要参数包括特性参数、规格参数和质量参数。这些参数从不同角度反映了一个电子元件的电气性能及其完成的功能。

(1) 电子元件的特性参数

特性参数用于描述电子元件在电路中的电气功能,通常用该元件的名称来表示,例如电阻特性、电容特性、电感特性、二极管特性、三极管特性等。一般可用伏安特性即元件两端的电压与通过的电流之间的关系来表达该元件的特性参数。电子元件的伏安特性大多是一条直线或曲线,在不同的测试条件下,伏安特性也可以是一条折线或一簇曲线,如图7-1所示。

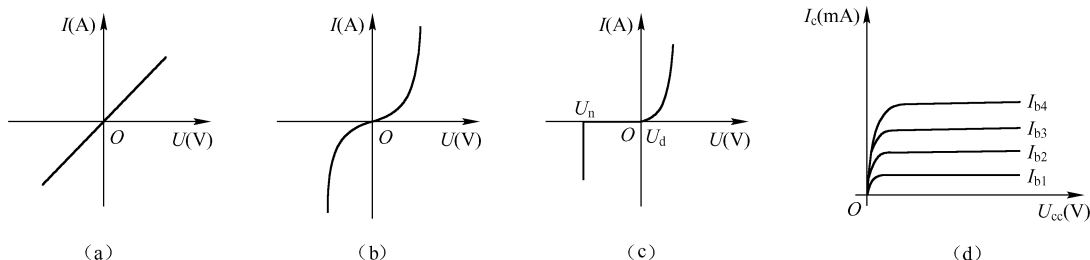


图7-1 几种常用电子元件的伏安特性曲线

(2) 电子元件的规格参数

描述电子元件的特性参数的数值称为它们的规格参数。规格参数包括标称值、额定值、允许偏差以及极限值等。

(3) 电子元件的质量参数

质量参数用于度量电子元件的质量水平,通常用以描述元件的特性参数、规格参数随某些因素变化的性能。电子元件共有的质量参数包括温度系数、噪声系数、高频特性以及稳定性和可靠性等。

知识 1.2 无源电路元件的参数

1. 电阻器

电阻器是一个耗能元件,实际电阻器并不是纯电阻,存在有引线电感和分布电容,当电阻器工作在低频时,主要为电阻性质,电抗性质可忽略,但工作在高频时就必须考虑其影响,电阻器的高频等效电路如图7-2(a)所示。

电阻器的主要参数有电阻值及其误差、额定功率、噪声系数、温度系数等,实际应用中,需要测量的主要参数是电阻值及其误差。

2. 电感器

电感器是一个储能元件,它不消耗能量,只与电源进行能量交换,通过电感的电流与其

两端电压的乘积为无功功率（存储功率 P_L ），电感器在交流电路中的电抗 $X_L = j\omega L$ 。

实际电感器由于电感线圈存在有直流电阻，使电感器消耗一定的能量，这种能量损耗称为电感器的电阻损耗。

实际电感器还存在分布电容，当电感器工作在低频时，分布电容可忽略，但工作在高频时就必须考虑其影响。电感器的高频等效电路如图 7-2（b）所示。

电感器的主要参数有电感量及其误差、分布电容、品质因数、额定电流、温度系数等，实际应用中需要测量的主要参数是电感量、品质因数及分布电容。

电感器的品质因数定义为存储功率 P_L 与消耗功率 P 之比，用 Q 表示。具体表达式为： $Q = P_L/P = \omega L/R$ ， Q 值越大，损耗越小，电感器的质量越好。

3. 电容器

电容器也是一个储能元件，它不消耗能量，只与电源进行能量交换，通过电容的电流与其两端电压的乘积为无功功率（存储功率 P_C ），电容器在交流电路中的电抗 $X_C = 1/j\omega C$ 。

实际电容器由于极板间的电介质存在漏电阻，会使电容器消耗一定的能量，这种能量损耗称为电容器的介质损耗。

实际电容器还存在引线电阻和电感，当电容器工作在低频时，引线电感可忽略，但工作在高频时必须考虑其影响，电容器的高频等效电路如图 7-2（c）所示。

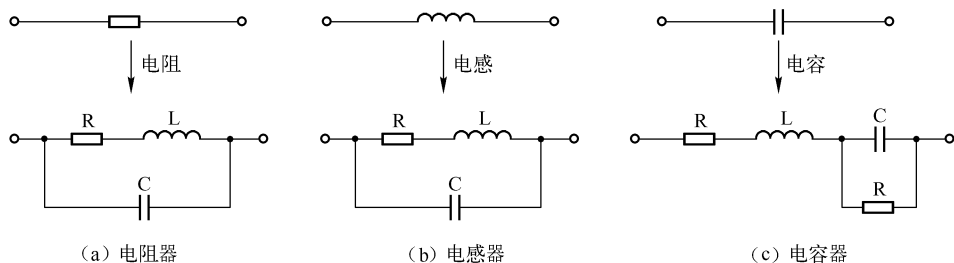


图 7-2 电路元件的高频等效电路

电容器的主要参数有电容量及其误差、额定电压、损耗因数、温度系数等，实际应用中需要测量的主要参数是电容量和损耗因数。

电容器的损耗因数定义为损耗功率 P 与存储功率 P_C 之比，用 D 表示。具体表达式为： $D = P/P_C = 1/\omega CR$ ， D 值越小，损耗越小，电容器的质量越好。

知识 1.3 电子元器件测量仪器的分类

不同类型、不同用途的电子元件，需要使用不同的测量仪器进行测量。测量仪器可按元件的类型分类。

1. 无源电路元件测量仪器

无源电路元件按其在电路中的工作频率，需采用不同的测量方法和不同的测量仪器。工作在低频电路中的元件，通常采用伏安法或电桥法测量，使用的仪器有直流电桥、交流电



桥、万用电桥、RLC 测量仪等；工作在高频电路中的元件，通常采用谐振法测量，使用的仪器有高频 Q 表、高频电感电容测量仪等。

2. 半导体分立器件测量仪器

半导体器件需要测量的参数较多，有直流参数、低频参数和高频参数等，测量不同的参数，使用的测量仪器也不同。常用的测量仪器有半导体管特性图示仪、半导体管直流参数测试仪、 h 参数测试仪、 Y 参数测试仪等。

3. 半导体集成电路测量仪器

半导体集成电路种类很多，测量不同类型的集成电路，需使用相应的测试仪器，常用的测量仪器有运算放大器测试仪、逻辑电路测试仪、专用集成电路测试仪等。这些仪器价格较高，使用受到限制，因此不在本书学习范围。

任务2 仪器介绍——万用电桥

工作在低频电路中的元件参数通常采用电桥法进行测量，电桥法实际上是一种比较测量法，它是把被测量与同类性质的标准量进行比较，从而确定被测量的大小。万用电桥就是一种在低频条件下测量电阻、电容和电感参数的交流阻抗电桥。

知识 2.1 电桥的分类及平衡条件

电桥由四个桥臂组成，在两个对角线接点 a、b 间加电源，另两个对角线接点 c、d 间接平衡指示表（检流计），按桥臂阻抗性质和供桥电源不同，电桥分为直流电桥和交流电桥。

1. 直流电桥

直流电桥电路原理如图 7-3 所示，这种电桥也称为惠斯登电桥，其四个桥臂均为电阻，由直流电源供电，因此它只能用来测量电阻。工作时，调节一个或几个桥臂上的电阻，使检流计指示为零即 $I_G = 0$ ，此时电桥处于平衡状态，c、d 两点电位相等，即 $U_{ac} = U_{ad}$ ， $U_{bc} = U_{bd}$ ，由此可得到

$$R_x/R_2 = R_3/R_4 \text{ 或 } R_x \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (7-1)$$

如果 R_2 、 R_3 、 R_4 均为标准电阻，则被测电阻：

$$R_x = R_2 \cdot R_3 / R_4 \quad (7-2)$$

由于 R_x 是与标准电阻直接进行比较，而标准电阻的准确度很高，且检流计的灵敏度也很高，因此用这种方法测出的电阻值准确度很高。

2. 交流电桥

交流电桥电路原理如图 7-4 所示，其工作原理与直流电桥基本相同，所不同的是四个桥臂均为阻抗，采用交流电源供电，平衡指示表为交流电表，因此它可以用来测量电阻、电

容和电感元件的参数。工作时,调节一个或几个桥臂上的阻抗,使检流计指示为零,此时电桥处于平衡状态, c、d 两点电位相等, 即 $u_{ac} = u_{ad}$, $u_{bc} = u_{bd}$, 由此可得到

$$Z_x/Z_2 = Z_3/Z_4, \text{或 } Z_x \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 \quad (7-3)$$

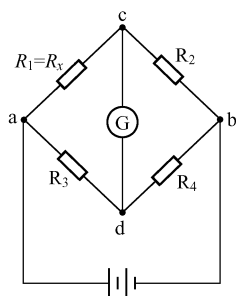


图 7-3 直流电桥原理图

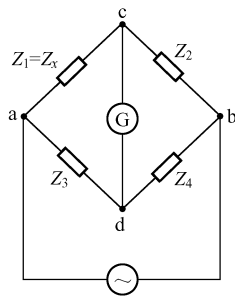


图 7-4 交流电桥原理图

其中 $Z_x = R_x + jX_x$; $Z_2 = R_2 + jX_2$; $Z_3 = R_3 + jX_3$; $Z_4 = R_4 + jX_4$ 。

根据复数相等条件,上式两边实部与虚部各自相等,可见交流电桥的平衡条件有两个:一个是幅度平衡条件,另一个是相位平衡条件。为此,交流电桥至少应有两个可调节的标准元件。为了使调节方便,交流电桥有两种基本形式。

(1) 电阻比率电桥

电阻比率电桥如图 7-5 所示。其特点是与 Z_x 相邻的桥臂 Z_3 是一个标准阻抗 Z_s , 另外两个桥臂为纯电阻, 此时可得

$$Z_x = (R_2/R_4) Z_s \quad (7-4)$$

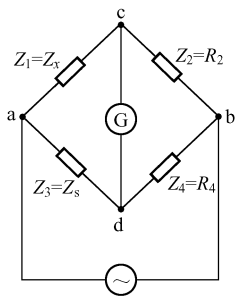
式中, R_2/R_4 为电阻之比, Z_x 与 Z_s 为同类性质的阻抗。在实际应用中, 通常用标准电容来测量未知电容。

(2) 电阻乘积电桥

电阻乘积电桥如图 7-6 所示。其特点是与 Z_x 对应的桥臂 Z_4 是一个标准阻抗 Z_s , 另外两个桥臂为纯电阻, 此时可得

$$Z_x = (R_2 \cdot R_3)/Z_s \quad (7-5)$$

式中, $R_2 \cdot R_3$ 为电阻乘积, Z_x 与 Z_s 互为倒数, 即为相反性质的阻抗, 因此这种电桥可用标准电容来测量未知电感。



7-5 电阻比率电桥

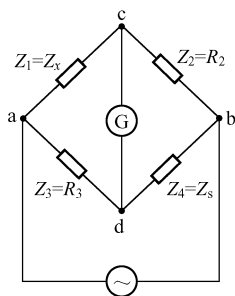


图 7-6 电阻乘积电桥



知识 2.2 万用电桥的工作原理

为了测量使用方便,将几种不同类型的电桥组合起来,使之具有测量电阻、电容和电感元件参数的功能,这种电桥就称为万用电桥。万用电桥主要由测量桥体,音频振荡器,交流放大器和平衡指示表等几部分组成,如图 7-7 所示。其测量桥体是由惠斯登电桥、电阻比率电桥、电阻乘积电桥组合而成,使用时通过转换开关进行切换。下面以常用的 QS18A 型万用电桥为例说明其测量原理。该仪器的外形如图 7-8 所示。



图 7-7 万用电桥的基本组成框图



图 7-8 QS18A 型万用电桥外形图

1. 电容测量原理

QS18A 型万用电桥的电容测量电路采用电容串联比较电桥(一种比率电桥),如图 7-9 所示,其中 C_x 、 R_x 为被测元件, C_s 、 R_s 为可调标准阻抗,即为读数桥臂, R_2 、 R_4 为比率桥臂。测量时调整标准阻抗和 R_2/R_4 的值使电桥处于平衡状态,则:

$$\text{被测电容 } C_x = (R_4/R_2) C_s;$$

$$\text{损耗电阻 } R_x = (R_2/R_4) R_s;$$

$$\text{损耗因数 } D_x = \omega C_s R_s。$$

2. 电感测量原理

QS18A 型万用电桥的电感测量电路采用麦氏—文氏电桥(一种乘积电桥),如图 7-10 所示,其中 L_x 、 R_x 为被测元件, C_s 、 R_s 为可调标准阻抗,即为读数桥臂, R_2 、 R_3 为倍率桥臂。测量时调整标准阻抗和 $R_2 \cdot R_3$ 的值使电桥处于平衡状态,则:

$$\text{被测电感 } L_x = R_2 \cdot R_3 C_s;$$

$$\text{损耗电阻 } R_x = R_2 \cdot R_3 / R_s;$$

$$\text{品质因数 } Q_x = \omega C_s R_s。$$

3. 电阻测量原理

QS18A 型万用电桥的电阻测量电路采用惠斯登电桥,如图 7-3 所示,其中 R_x 为被测电阻,其余均为标准电阻, R_3 为读数桥臂, R_2 、 R_4 为比率桥臂。测量时,调整 R_3 和 R_2/R_4 的值,使电桥处于平衡状态,则被测电阻 $R_x = R_3 \cdot R_2/R_4$ 。

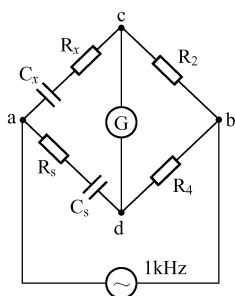


图 7-9 电容串联比较电桥

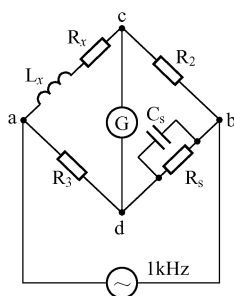


图 7-10 麦氏—文氏电桥

知识 2.3 万用电桥的使用

1. QS18A 型万用电桥的主要技术指标

(1) 电容测量：1.0pF ~ 1100μF 分八挡

1.0pF ~ 110pF，准确度 $\pm(2\% + 0.5\text{pF})$ ；100pF ~ 110μF， $\pm(1\% + \Delta)$ ；100 ~ 1100μF， $\pm(5\% + \Delta)$ ；

D 值：0 ~ 0.01；0 ~ 10。

(2) 电感测量：1.0μH ~ 110H 分八挡

1.0 ~ 11μH，准确度 $\pm(5\% + 0.5\mu\text{H})$ ；10 ~ 110μH， $\pm(2\% + \Delta)$ ；

100μH ~ 1.1H， $\pm(1\% + \Delta)$ ；1 ~ 11H， $\pm(2\% + \Delta)$ ；10 ~ 110H， $\pm(5\% + \Delta)$ ；

Q 值：0 ~ 10。

(3) 电阻测量：10mΩ ~ 11MΩ 分八挡

10mΩ ~ 1.1Ω，准确度 $\pm(5\% + 0.5\text{m}\Omega)$ ；1Ω ~ 1.1MΩ， $\pm(1\% + \Delta)$ ；1Ω ~ 11MΩ， $\pm(5\% + \Delta)$ 。

测量电感、电容及 10mΩ ~ 10Ω 电阻使用 1kHz 电源，电阻 > 10Ω 挡使用直流 9V 电池。

2. QS18A 型万用电桥的面板

QS18A 型万用电桥的面板标示如图 7-11 所示，各开关旋钮的使用功能如下。

① 测量接线柱 用来连接被测元件。

② 外接电源插孔 当使用外接音频电源时，由此插孔接入。

③ 电源转换开关 用于转换电桥电源，分有内部 1kHz 和外接两挡。

④ 量程选择开关 用于选择测量范围，各挡的标示值是指读数在满度时的最大值。

⑤ 损耗倍率开关 用于选择损耗平衡的读数范围，分 $Q \times 1$ ， $D \times 0.01$ ， $D \times 1$ 三挡。测量电感线圈时，此开关放在 $Q \times 1$ 处，测量小损耗电容时，放在 $D \times 0.01$ 处，测量大损耗电容时，放在 $D \times 1$ 处，测量电阻时，此开关不起作用。

⑥ 平衡指示表 用以指示电桥的平衡状态，调节读数旋钮和损耗平衡时，应使指针向零位偏转，当指针接近于零点时，可认为电桥已处于平衡状态。

⑦ 接地端子 仪器接地点，与外壳相连，使用时应接地，以减小干扰影响。

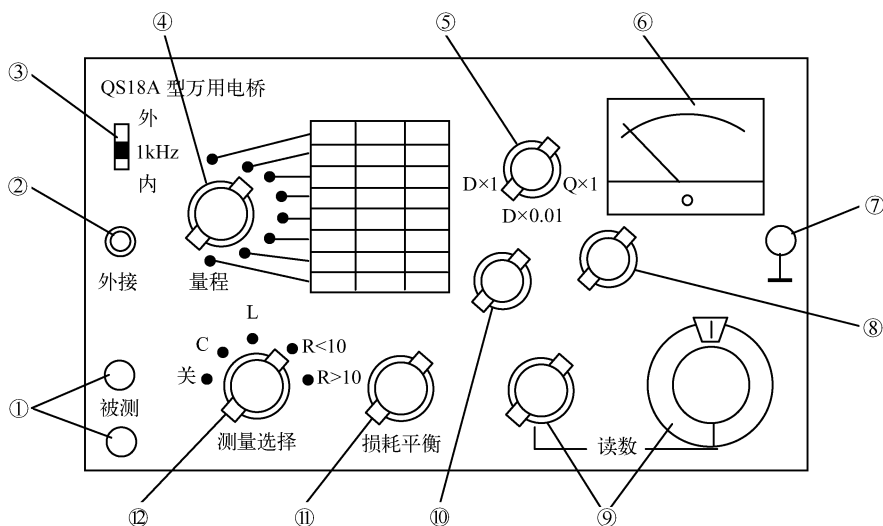


图 7-11 QS18A 型万用电桥面板图

⑧ 灵敏度调节 用于调节电桥放大器的放大倍数，开始测量时，应降低灵敏度使平衡指示表指示小于满刻度，当电桥接近于平衡时，再适当增大灵敏度。

⑨ 测量读数盘 被测元件的值由此度盘指示，它由一个步进式读数盘和一个连续可调的读数盘组成。两读数盘的示值之和再乘以量程开关的示值，即为测得值。

⑩ 损耗平衡微调 用于微调平衡时的损耗值，一般情况下，应放在“0”的位置。

⑪ 损耗平衡度盘 被测电感或电容元件的损耗值由此度盘指示，此读数盘的示值再乘以损耗倍率开关的示值，即为测得值。

⑫ 测量选择开关 用于转换测量功能，进行电容、电感或电阻的测量。它又兼电源开关，测量完毕后应置于“关”的位置，以免浪费电池。

3. QS18A 型万用电桥的使用方法

(1) 把被测元件接在测量接线柱上，根据被测元件的性质，将“测量选择”开关置于相应的位置。

(2) 估计被测元件的大小，将“量程选择开关”置于合适的挡位。

(3) 根据被测元件的性质，合理选择“损耗倍率”开关的挡位。

(4) 调节“灵敏度调节”旋钮，使平衡指示表指针略小于满度。

(5) 测量电感和电容时，应反复调节“读数旋钮”和“损耗平衡”旋钮使平衡指示表指针最接近于零点，测量电阻时，只调节“读数旋钮”即可。

(6) 读取测量值。

C_x 、 L_x 、 R_x 的值等于“量程开关”示值乘以两个“读数旋钮”示值之和。

D_x 、 Q_x 的值等于“损耗倍率”示值乘以“损耗平衡”示值。

【例 7.1】 有一标称值为 510pF 的电容，用 QS18A 型万用电桥测量。试问 ① 量程选择开关和损耗倍率开关应放在何位置？② 若两读数盘示值分别为 0.5 和 0.043，损耗平衡示值为 1.2，其电容量和损耗值各为多少？

解：① 量程选择开关应放在 1000pF 处，损耗倍率开关应放在 $D \times 0.01$ 处。

② $C = 1000 \times (0.5 + 0.034) = 534\text{pF}$ ； $D = 0.01 \times 1.2 = 0.012$ 。

任务3 仪器介绍——高频 Q 表

工作在高频电路中的元件参数通常采用谐振法进行测量，谐振测量法就是把被测元件接入 LC 回路，然后调节回路参数使之产生谐振，再根据相应的关系来确定被测量的数值。虽然它没有电桥法的测量准确度高，但它的测量条件与使用条件相近，且测量电路简单，受分布参数影响小，因此得到广泛的应用。

高频 Q 表就是一种利用谐振法，在高频条件下测量电感的电感量及品质因数（ Q 值）、电感线圈的分布电容、电容的电容量及损耗因数（ D 值）、高频谐振回路的 Q 值和等效电阻及传输线的阻抗特性等参数的多用途仪器。

知识 3.1 高频 Q 表的组成

高频 Q 表一般由高频振荡器、频率指示器、测量回路、 Q 值指示器和电源电路几部分组成，其基本组成框图如图 7-12 所示。

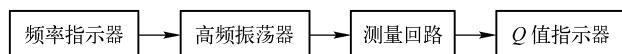


图 7-12 高频 Q 表基本组成框图

(1) 高频振荡器

高频振荡器可产生 $50\text{kHz} \sim 50\text{MHz}$ 的高频信号，一般将其分为几个波段，由波段开关转换，在每个波段内，频率均可连续调节，高频振荡信号经放大和稳幅后输出。

(2) 频率指示器

频率指示器通常有刻度盘指示和数码管指示两种，数码管频率指示器实际上是一个数字频率计，它可精确指示高频振荡器输出信号的频率。

(3) 测量回路

测量回路中有两个标准可变电容器，一个是主调电容器，另一个是微调电容器，它们与被测线圈或辅助线圈组成串联谐振电路，以进行各种测量。

(4) Q 值指示器

Q 值指示器实际上是一个高频电子电压表，它并联在串联谐振电路的标准可变电容器两端，当谐振回路处于谐振状态时，电容器两端的电压达到最大值，此电压值可用来表示谐振回路的 Q 值。

知识 3.2 高频 Q 表的工作原理

高频 Q 表是利用谐振原理来进行各种测量，用谐振电压的比值来确定 Q 值，电容和电感的测量，通常是采用替代法。高频 Q 表主要测量功能的工作原理如下：



(1) Q 值测量原理

高频 Q 表测量线圈 Q 值采用的是串联谐振原理, 简化电路如图 7-13 所示。在回路中加入一个已知幅度为 U_i 、频率为 f 的电压, 当谐振时有 $X_L = X_C$, 总阻抗 $Z = R$, 则回路电流

$$i = \frac{U_i}{Z} = \frac{U_i}{R} = \frac{U_L}{X_L} = \frac{U_C}{X_C} \quad (7-6)$$

根据 $Q = X_L/R = X_C/R$ 可得

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{U_C}{U_i} \quad (7-7)$$

可见用两个电压的比值可以表示 Q 值, 当 U_i 为定值时, 如果测得 U_C 的值就相当于测得了回路的 Q 值。

(2) 电容测量原理

高频 Q 表测量电容时是采用并联替代法, 简化电路如图 7-14 所示。测试时, 先将标准可变电容器的容量放在最大位置上, 此时电容量为 C_{s1} , 调节振荡器频率, 使谐振回路谐振, 然后将被测电容 C_x 与标准可变电容器并联, 保持原来的频率不变, 减小标准可变电容器的容量使谐振回路恢复谐振, 此时电容量为 C_{s2} , 根据标准可变电容器容量的改变值, 可求得被测电容, 即 $C_x = C_{s1} - C_{s2}$ 。

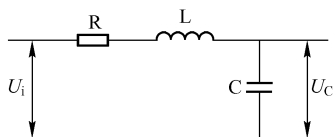


图 7-13 Q 值测量原理

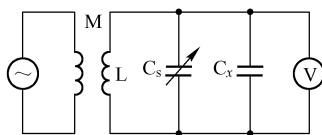


图 7-14 并联替代法测电容

并联替代法只能测电容量小于标准可变电容器变化范围的电容器, 由于标准可变电容器的变化范围有限, 故测量范围较小。当被测电容量大于标准可变电容器变化范围时, 可根据被测电容的估计值, 选择一个适当的已知容量的电容器 C_n 作辅助元件, 再用上述方法进行测量, 此时, $C_x = C_{s1} - C_{s2} + C_n$, C_n 的选择必须使其容量与标准可变电容器的变化范围之和大于被测电容值。

(3) 电感测量原理

高频 Q 表测电感时采用的是串联替代法, 简化电路如图 7-15 所示。测试时, 先把图中 1、2 两点短路, 将标准可变电容器的容量放在最大位置上, 此时电容量为 C_{s1} , 调节振荡器频率使谐振回路谐振, 则固有电感值为

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{s1}} \quad (7-8)$$

然后拆除短路线, 接入被测电感 L_x , 保持原来的频率不变, 减小标准可变电容器的容量, 使谐振回路恢复谐振, 此时电容量为 C_{s2} , 则回路总电感为

$$L_x + L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{s2}} \quad (7-9)$$

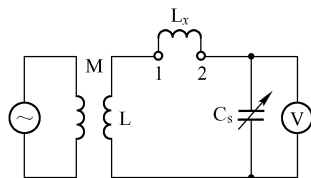


图 7-15 串联替代法测电感

两式相减可得:

$$L_x = \frac{1}{4\pi^2 f^2} \frac{C_{s1} - C_{s2}}{C_{s1} C_{s2}} \quad (7-10)$$

知识 3.3 高频 Q 表的使用

高频 Q 表的型号也很多,但测量使用方法基本相同,下面以 QBG-3D 型高频 Q 表为例说明高频 Q 表的使用方法。该仪器振荡频率指示采用数字式频率计, Q 值指示采用数字式电压表,除了具有一般 Q 表的测量功能外,还具有 Q 值合格和 Q 值预置功能,便于批量元件的测量。QBG-3D 型高频 Q 表的外形如图 7-16 所示。



图 7-16 QBG-3D 型高频 Q 表的外形图

1. QBG-3D 型高频 Q 表的主要技术指标

- (1) Q 值测量范围: 5 ~ 1000 分四挡 30; 100; 300; 1000, 准确度 $\pm 10\%$;
- (2) 电感测量范围: 0.1 μH ~ 1H 分七挡
0.1 ~ 1 μH ; 1 ~ 10 μH ; 10 ~ 100 μH ; 0.1 ~ 1mH; 1 ~ 10mH; 1 ~ 10mH; 10 ~ 100mH, $\pm 5\%$;
- (3) 电容测量范围: 1 ~ 460pF
主调电容 40 ~ 500pF; 微调电容 $\pm 3\text{pF}$; 准确度 150pF 以上 $\pm 1\%$; 150pF 以下 $\pm 1.5\text{pF}$;
- (4) 振荡频率范围: 25kHz ~ 50MHz 分七挡
25 ~ 74kHz; 74 ~ 213kHz; 213 ~ 700kHz; 0.7 ~ 1.95MHz; 1.95 ~ 5.2MHz; 5.2 ~ 17MHz; 17 ~ 50MHz, 准确度 $10^{-4} \pm 1$ 个字。
- (5) Q 值合格预置范围: 5 ~ 1000。

2. QBG-3D 型高频 Q 表的面板

QBG-3D 型高频 Q 表的面板标示如图 7-17 所示,各开关旋钮功能说明如下。

- ① 振荡频率指示表 为五位数字频率表,用于指示加在测量回路上的高频信号频率。
- ② 频率单位指示灯 指示频率单位, kHz 或 MHz。
- ③ Q 值合格指示灯 当被测器件的 Q 值超过预置 Q 值时此灯亮,表示 Q 值合格。
- ④ Q 值测量指示表 为三位数字式电压表,用于指示 Q 值。
- ⑤ 微调电容调节旋钮 用于微调标准可变电容器的容量,上方窗口内为微调电容变化范围指示, $-3\text{pF} \sim +3\text{pF}$ 。
- ⑥ 主调电容调节旋钮 用于调节标准可变电容器的容量,上方窗口内为主调电容的电

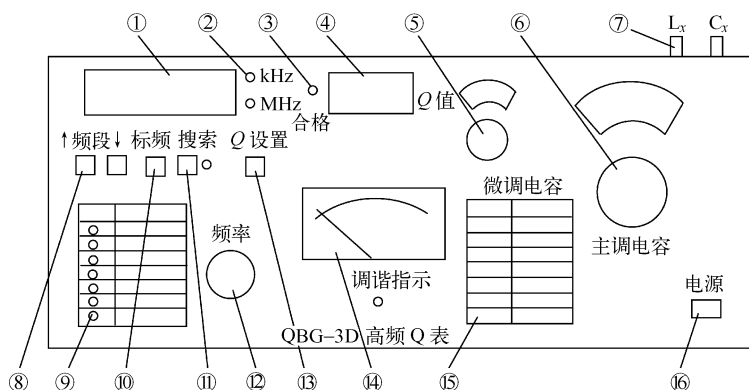


图 7-17 QBG-3D 型高频 Q 表面板布置图

容值和谐振时对应的电感值，用来读取测量值。

⑦ 测量接线柱 在仪器的顶部有两对测量接线柱，测电感时， L_x 处接被测电感， C_x 处开路；测电容时， C_x 处接被测电容， L_x 处接辅助电感（由仪器生产厂家提供）。

⑧ 工作频段转换按键 两个按键，每按一次，切换至低一个或高一个频段工作。

⑨ 工作频段指示灯 指示表格内对应的频率范围。

⑩ 标准测试频率按键 按下为标准测试频率，各频段标准测试频率见电感对照表。

⑪ 谐振点自动搜索键 按下右上角指示灯亮，仪器工作在自动搜索状态，自动搜索谐振点，若要退出，再按一次此键。

⑫ 频率调节旋钮 用于每个频段内的频率连续调节，以选择所需频率。

⑬ Q 值预置按键 用于批量元件测量时预置 Q 值的合格值。

⑭ Q 值调谐指示表 用于指示回路的谐振状态，指针达到最大时表示谐振。

⑮ 电感测试对照表表 列出了各工作频段的电感测量范围和标准测试频率。

⑯ 电源开关 按下打开整机电源，频率指示表和 Q 值指示表数字亮。

3. QBG-3D 型高频 Q 表的使用方法

(1) 测试准备

① 将仪器水平放置，先校准 Q 值指示表的机械零点，并将微调电容量盘调到零；

② 接通电源，预热 30min，待仪器稳定后再进行测量；

③ 被测件和仪器测量接线柱间的连接线应尽量短，足够粗，并接触良好，以减小接线电阻和分布参数带来的测量误差。

④ 被测件不要直接放在仪器顶部，应离顶部 10mm 以上，必要时用低损耗绝缘材料作衬垫物把被测件垫起。

⑤ 不要将手靠近被测件，以免人体感应造成测量误差。有屏蔽罩的被测件，屏蔽罩应接在低电位端的接线柱上。

⑥ 调节主调电容器的旋钮时，应注意当刻度调到最大和最小值时，不要用力再调。

(2) 高频线圈 Q 值的测量（基本测量法）

① 将被测线圈接在 L_x 接线柱上，选择测量频段，并调节振荡频率到所需频率值上；

② 调主调电容器远离谐振点位置,使 Q 值指示表指示为最小;

③ 先调主调电容器到谐振,再调微调电容器到精确谐振点,即 Q 值读数达最大值,此时读数即为被测线圈的有效 Q 值 Q_e ;

④ 若需要得到线圈的真实 Q 值,须应先按下面(4)中的方法测得线圈的分布电容 C_0 ,并记下谐振时的电容量 C_1 ,然后按下式修正

$$Q = Q_e \frac{C_1 + C_0}{C_1} \quad (7-11)$$

(3) 高频线圈电感量的测量

① 将被测线圈接在 L_x 接线柱上,估计被测线圈的电感量,在面板对照表上选择一个标准频率,将振荡频率调到这一标准频率上;

② 调主调电容器到谐振,这时读数盘上指示的电感读数再乘以对照表上所指的倍数,即为线圈的有效电感量 L_e ;

③ 如要得到线圈的真实电感量,须先按下面(4)中的方法测得电感线圈的分布电容 C_0 ,并记下谐振时的电容量 C_1 ,然后将主调电容器调到 $C_1 + C_0$ 值上,这时读数盘上指示的读数值再乘以对照表上对应的倍数,即为线圈的真实电感量。也可按下式修正

$$L = L_e \frac{C_1}{C_1 + C_0} \quad (7-12)$$

(4) 高频线圈分布电容的测量(两倍频法)

① 将被测线圈接在 L_x 接线柱上;

② 将主调电容器调到 C_1 上,通常取 $C_1 = 200\text{pF}$ 较宜。转换频段选择按键开关,并调节振荡频率,找到谐振频率 f_1 ,然后把频率调到 f_1 的两倍处。

③ 调主调电容器再次谐振,此时电容值为 C_2 ,则线圈的分布电容

$$C_0 = \frac{C_1 - 4C_2}{3} \quad (7-13)$$

(5) 电容器电容量的测量

① 选择一个适当的辅助电感接到 L_x 接线柱上;

② 将主调电容器调到较大值 C_1 上,切换工作频段并调节振荡频率到谐振;

③ 将被测电容接到 C_x 接线柱上,调主调电容器再到谐振,此时电容值为 C_2 ,则被测电容量 $C_x = C_1 - C_2$;

④ 对于大于 460pF 的电容器,要先选取一个已知容量的辅助电容 C_3 接到 C_x 接线柱上,进行①、②步骤。然后拆下辅助电容接上被测电容,调主调电容器再到谐振,此时电容值为 C_2 ,则被测电容量 $C_x = C_1 - C_2 + C_3$ 。

(6) 电容器损耗因数的测量

① 先按(5)中①、②步骤进行,读得此时的 Q 值为 Q_1 ,电容量为 C_1 ;

② 将被测电容接到 C_x 接线柱上,调主调电容器再到谐振,读得此时的 Q 值为 Q_2 ,电容量为 C_2 ;

③ 若回路电感自身的电容为 C_0 (C_0 值由仪器生产厂家提供),则电容器的损耗因数 D

$$D = \frac{1}{Q} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2} \cdot \frac{C_1 + C_0}{C_1 + C_2} \quad (7-14)$$



④ 可按下式计算电容器的有效并联损耗电阻 R_p

$$R_p = \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 - Q_2} \cdot \frac{1}{2\pi f(C_1 + C_0)} \quad (7-15)$$

任务4 仪器介绍——半导体管特性图示仪

半导体管特性图示仪是一种采用图示法直接在示波管上显示各种半导体管特性曲线的多用途测试仪器，通过仪器的标尺刻度可直接读出半导体管的各项参数。可测量各种 PNP 和 NPN 三极管的输入特性、输出特性、电流放大特性；各项反向饱和电流和反向击穿电压；各类半导体二极管的正、反向特性；场效应管的漏极特性、转移特性、夹断电压和跨导等，此外还可测量晶闸管和单结半导体管的特性参数。

半导体管特性图示仪与其他半导体器件测试仪相比，具有用途广范、直接显示、读数简便等优点，尤其是在半导体管的各种极限参数和击穿特性的观测上，由于测试时采用瞬时电压和瞬时电流，能使被测半导体管只承受瞬时过载而不致造成损坏，因此对半导体管的测试和半导体管的合理应用都带来极大方便，但它不能用于测量半导体管的高频参数。

知识 4.1 半导体管特性图示仪的组成

1. 特性曲线的逐点测试法

了解图示测试法原理，先看一下逐点测试法测试三极管输出特性曲线的测量过程，小功率 NPN 型三极管的共发射极输出特性曲线和基本测试电路如图 7-18 所示。

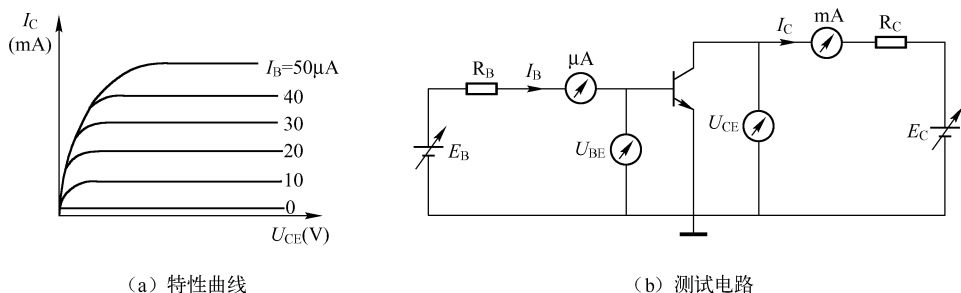


图 7-18 NPN 型三极管共发射极输出特性曲线及测试电路

测试时，首先调节 E_B 使基极电流为 I_{B1} ，逐点改变 E_C 可测得一组 U_{CE} 和 I_C 值，再调节 E_B 使基极电流为 I_{B2} ，同样改变 E_C ，可测得一组 U_{CE} 和 I_C 值，重复上述过程，可测得多组 U_{CE} 和 I_C 值，把这些值在直角坐标系中描点作图，即可绘出如图所示的输出特性曲线。

可以看出，这种测试费时费力，还易引起半导体管过载而导致发热损坏。若想让其自动测试并显示出特性曲线来，需要以下几个条件：第一，要有一个能提供每一个测试过程所需的基极电流 I_{Bi} ；第二，对每一个固定的基极电流，集电极电压应会自动改变；第三，要能及时取出 U_{CE} 和 I_C 值送到显示电路，显示出输出特性曲线。

2. 半导体管特性图示仪的组成

半导体管特性图示仪是由集电极扫描电压发生器、基极阶梯信号发生器、 X 和 Y 放大器、示波管及附属电路、电源电路几部分组成，其组成框图如图 7-19 所示。

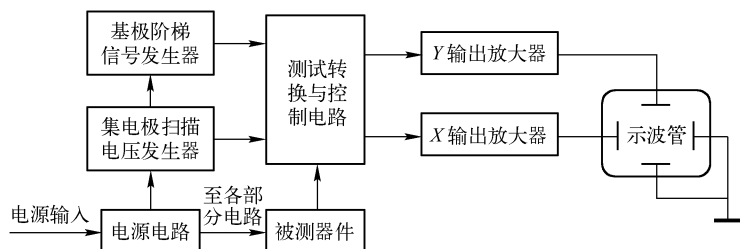


图 7-19 半导体管特性图示仪原理框图

在图示仪中，所需的基极电流由基极阶梯信号发生器提供，所需的集电极电压由集电极扫描电压发生器提供，需要测试的电压和电流值通过放大器放大后加在示波管的 X 轴和 Y 轴上，由示波管显示出来。

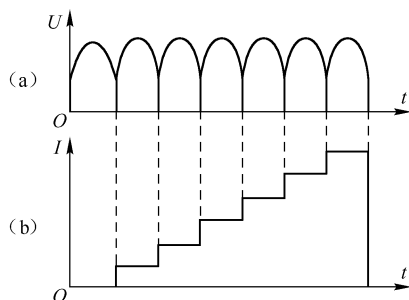


图 7-20 阶梯信号和扫描电压波形

(1) 集电极扫描电压发生器

集电极扫描电压发生器可产生如图 7-20 (a) 所示的集电极扫描电压，它是正弦半波，幅值可以调节，用于形成水平扫描线。

(2) 基极阶梯信号发生器

基极阶梯信号发生器可产生如图 7-20 (b) 所示的基极阶梯信号，阶梯高度可以调节，用于形成多条曲线簇。

(3) X 和 Y 轴放大器

X 和 Y 轴放大器用于把从被测器件上取出的电压和电流信号进行放大，然后送至示波管的相应偏转板上，以形成扫描曲线。

(4) 示波管及附属电路

示波管及附属电路与示波器电路相同，可调节光点的亮度、聚焦、水平和垂直位置。

(5) 电源电路

电源电路为仪器提供各种工作电源，包括低压直流电源和示波管所需的高压电源。

知识 4.2 半导体管特性图示仪的工作原理

半导体管特性图示仪各种测试功能的工作原理如下。

1. 二极管正、反向特性曲线的测试

测试原理框图如图 7-21 所示，图中 R_s 为电流取样电阻， R_c 为限流电阻。

测正向特性时，扫描电压为正极性，零点位于屏幕的左下角处。测反向特性时，扫描电压为负极性，零点位于屏幕的右上角处。

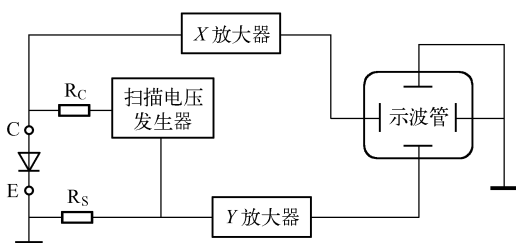


图 7-21 二极管正、反向特性曲线的测试原理框图

2. 三极管输入和输出特性曲线的测试

测试原理框图如图 7-22 和图 7-23 所示, 图中 R_S 为电流取样电阻, R_C 为集电极电阻。测试 NPN 型管时集电极扫描电压和基极阶梯电流均为正极性, 零点位于屏幕的左下角处。测试 PNP 型管时均为负极性, 零点位于屏幕的右上角处。

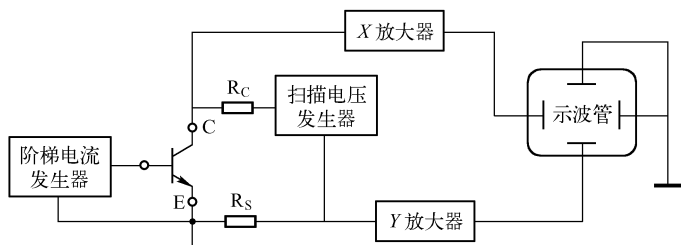


图 7-22 半导体三极管输出特性曲线测试原理框图

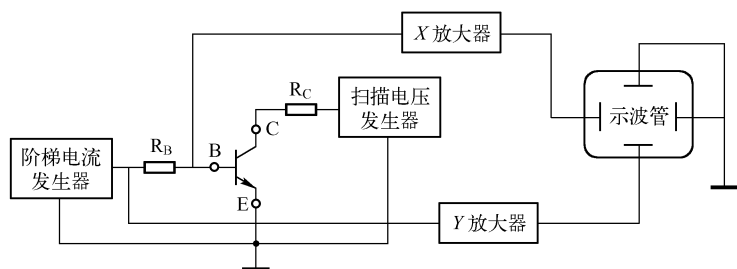


图 7-23 半导体三极管输入特性曲线测试原理框图

3. 场效应管的漏极特性和转移特性曲线的测试

测试原理框图如图 7-24 和图 7-25 所示。图中 R_S 为电流取样电阻, R_C 为漏极电阻。

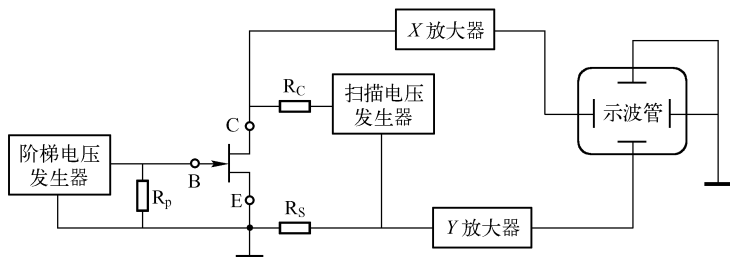


图 7-24 场效应管漏极特性曲线测试原理框图

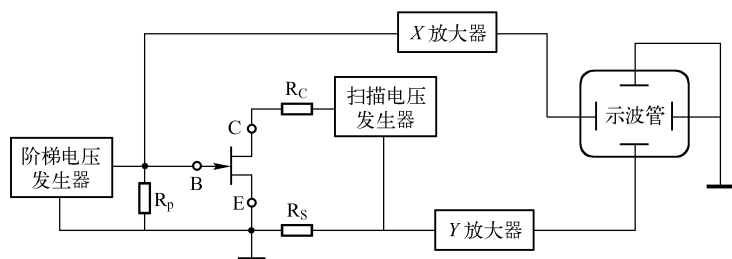


图 7-25 场效应管转移特性曲线测试原理框图

测试 N 沟道场效应管时，扫描电压为正极性，基极阶梯电压对于耗尽型为负极性，增强型为正极性；测试 P 沟道场效应管时，扫描电压为负极性，基极阶梯电压对于耗尽型为正极性，增强型为负极性。

知识 4.3 半导体管特性图示仪的使用方法

半导体管特性图示仪的型号也很多，使用方法基本相同。下面以 XJ4810 型半导体管特性图示仪为例，说明图示仪的技术指标和使用方法。该仪器与早期产品相比，电路中采用了集成电路器件，使其体积、重量和功耗都大大减小。它除有一般图示仪的功能外，还具有双簇曲线同时显示功能，便于测量比较，使用十分方便。XJ4810 型半导体管特性图示仪的外形如图 7-26 所示。

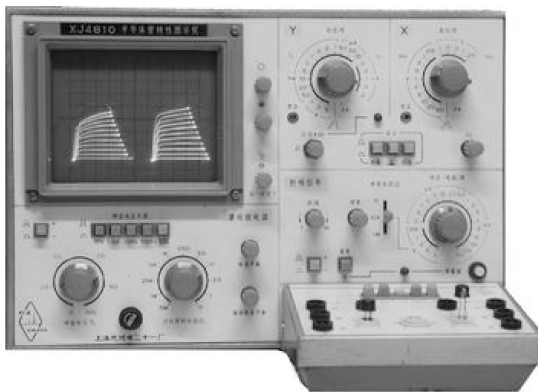


图 7-26 XJ4810 型半导体管特性图示仪外形图

1. XJ4810 型半导体管特性图示仪的主要技术指标

(1) Y 轴偏转因数

- ① 集电极电流范围： $10\mu\text{A} \sim 500\text{mA}/\text{div}$ ，分 15 挡，误差小于 $\pm 3\%$
- ② 二极管反向漏电流： $0.2\mu\text{A} \sim 5\mu\text{A}/\text{div}$ ，分 5 挡，误差小于 $\pm 10\%$
- ③ 基极电流或基极源电压： $0.05\text{V}/\text{div}$ ，误差小于 $\pm 3\%$
- ④ 外接输入： $0.05\text{V}/\text{div}$ ，误差小于 $\pm 3\%$

(2) X 轴偏转因数

- ① 集电极电压范围： $0.05\text{V} \sim 50\text{V}/\text{div}$ ，分 10 挡，误差小于 $\pm 3\%$



② 基极电压范围: $0.05\text{V} \sim 1\text{V}/\text{div}$, 分 5 挡, 误差小于 $\pm 3\%$

③ 基极电流或基极源电压: $0.05\text{V}/\text{div}$, 误差小于 $\pm 3\%$

④ 外接输入: $0.05\text{V}/\text{div}$, 误差小于 $\pm 3\%$

(3) 基极阶梯信号

① 阶梯电流范围: $0.2\mu\text{A} \sim 50\text{mA}/\text{级}$, 分 17 挡, 误差小于 $\pm 5\%$

② 阶梯电压范围: $0.05\text{V} \sim 1\text{V}/\text{级}$, 分 5 挡, 误差小于 $\pm 5\%$

③ 串联电阻: $0; 10\text{k}\Omega; 1\text{M}\Omega$ 分 3 挡, 误差小于 $\pm 10\%$

④ 每簇级数: $1 \sim 10$ 连续可调

⑤ 每秒级数: $200/\text{s}$

⑥ 信号极性: “+”, “-” 分 2 挡

(4) 集电极扫描信号

① 峰值电压范围: $0 \sim 500\text{V}$ 分 4 挡 $0 \sim 10\text{V}$, $0 \sim 50\text{V}$, $0 \sim 100\text{V}$, $0 \sim 500\text{V}$

② 电流容量: $10\text{V}, 5\text{A}; 50\text{V}, 1\text{A}; 100\text{V}, 0.5\text{A}; 500\text{V}, 0.1\text{A}$

③ 功耗限制电阻: $0 \sim 500\text{k}\Omega$, 分 11 挡, 误差小于 $\pm 10\%$

④ 信号极性: “+”, “-” 分 2 挡

2. XJ4810 型半导体管特性图示仪的面板

XJ4810 型半导体管特性图示仪的面板标示如图 7-27 所示, 按各开关旋钮的作用可划分为示波管控制、集电极扫描电压、基极阶梯信号、X 轴 Y 轴偏转和器件测试台五大部分。

(1) 示波管控制部分

① 辉度调节 用于调节曲线的亮度

② 聚焦调节 用于调节曲线的清晰度

③ 辅助调节 用于聚焦的辅助调节

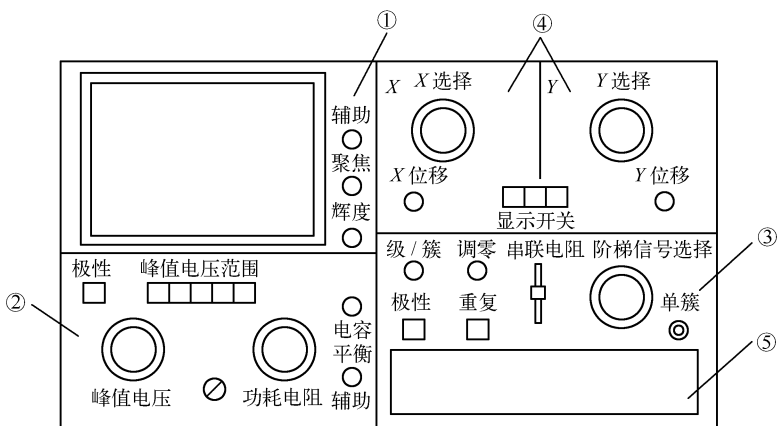


图 7-27 XJ4810 型半导体管特性图示仪的面板布置图

(2) 集电极扫描电压部分

① 峰值电压范围 为五挡旋转开关, 用于选择测试所需的集电极最高电压值。

② 电压极性 用于改变集电极扫描电压的极性, 极性的选择取决于被测器件。

③ 峰值电压调节 用于在选择的电压范围内连续调节集电极电压。

④ 功耗限制电阻 它是串联在被测半导体管集电极回路中的电阻，用于限制其功耗，也可作为集电极负载电阻。

⑤ 电容平衡调节 由于集电极电流输出端对地有各种杂散电容存在会形成电容性电流，造成测量误差，测试前应调节电容平衡，使容性电流减至最小。

⑥ 辅助电容平衡 它是对集电极扫描变压器次级绕组对地电容的不对称再次进行电容平衡调节。

(3) 基极阶梯信号部分

① 阶梯信号选择开关 它是具有 22 挡，两种作用的开关，基极电流 17 挡，基极源电压 5 挡，用于选择基极阶梯信号的阶梯大小。

② 极性开关 用于改变基极阶梯信号的极性，极性的选择取决于被测器件。

③ 级/簇调节 用于调节阶梯信号的级数，在 0 ~ 10 范围内连续可调。

④ 阶梯调零 用于调节阶梯信号的零位，测试前应先进行零位校准。

⑤ 重复开关 当置于“重复”位置时阶梯信号重复出现，作正常测试，置于“关”的位置时，阶梯信号处于待触发状态。

⑥ 单簇按钮 单簇按钮的作用是使预先调好的电压（电流）/级，出现一次阶梯信号后即回到待触发位置。

⑦ 串联电阻 用于调节基极串联电阻，当阶梯信号选择开关置于电压/级的位置时，将电阻串联在被测半导体管的输入回路中。

(4) X 轴 Y 轴偏转部分

① X 轴选择开关 它是具有 17 挡，四种作用的旋转开关，用于选择水平偏转灵敏度。

② X 轴增益 用于连续调节水平幅度。

③ X 轴位移 用于扫描线在水平方向移动。

④ Y 轴选择开关 它是具有 22 挡，四种作用的旋转开关，用于选择垂直偏转灵敏度。

上面带有一个推拉倍率开关，拉出为 $\times 0.1$ 。

⑤ Y 轴增益 用于连续调节垂直幅度。

⑥ Y 轴位移 用于扫描线在垂直方向移动。

⑦ 显示开关 为三挡按键开关，用于显示选择。

• 转换 使图像在 I, III 象限内相互转换，以简化 NPN 管转为测 PNP 管的操作。

• 接地 使放大器输入接地，以显示输入为零的基准点。

• 校准 对 X、Y 放大器进行标度校正。

(5) 器件测试台部分

器件测试台标示如图 7-28 所示。

① 测试选择开关 为五挡按键开关，用于测试选择；

• “左”或“右”分别按下时，为左或右被测管单独观测；

• “两簇”按下时，为左、右两个被测管同时观测；

• “零电压”按下时，可进行阶梯信号的零位校准；

• “零电流”按下时，使被测三极管的基极处于开路状态，可进行 I_{CEO} 的测量。

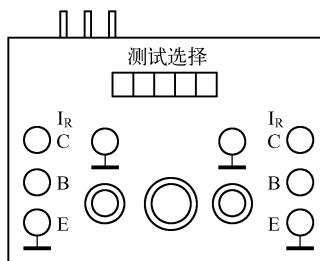


图 7-28 XJ4810 型图示
仪测试台图



- ② 器件插座 测试时用来插入被测器件，它适用于测试中小功率管。
- ③ 测试接线柱 可配合外接插座使用，其内部接线较粗，适用于测试大功率管。

3. 使用前的调整

半导体管特性图示仪面板上的开关、旋钮较多，且相互联系密切，使用起来比较复杂。因此测试前必须了解其基本测试原理，熟悉测量使用方法，并且还要知道被测半导体管的性能、规格和测试条件，才能进行正确测试。

(1) 开启电源开关，指示灯亮，预热 15min，再开始测试调整。

(2) 调节辉度、聚焦、辅助聚焦旋钮，使屏幕上显示清晰的光点或线条。

(3) 根据被测半导体管的特性和测试条件的要求，把 X 轴作用、 Y 轴作用、基极阶梯信号各部分的开关、旋钮都调到相应的位置上。

(4) 进行基极阶梯信号调零，目的是使基极阶梯信号的起始级为零电位，以保证测量准确度。调零方法如下：当荧光屏上出现基极阶梯信号后，按下测试台上的“零电压”键，观察光点停留在荧光屏上的位置，复位后调节“阶梯调零”旋钮，使阶梯信号的起始级光点处于该位置上，则基极阶梯信号的零位即被校准。

4. 使用注意事项

(1) 对阶梯信号选择、功耗限制电阻、峰值电压范围三个旋钮的使用应特别注意，若使用不当会损坏被测半导体管。

(2) 测试大功率半导体管和极限参数、过载参数时，应采用单簇阶梯信号，以防过载损坏被测器件。

(3) 测试 MOS 型场效应管时，应特别注意不要使栅极悬空，以免因感应电压过高引起被测管击穿。

(4) 测试使用完后，即关闭电源，并使仪器复位，以防下次使用时因疏忽而损坏被测器件。此时应将“峰值电压范围”开关置于 $0 \sim 10V$ 挡，“峰值电压调节”旋到零位，“阶梯信号选择”开关置于关，“功耗限制电阻”置于 $10k\Omega$ 以上位置。

任务5 应用实训——电子元器件测量实训

实训 5.1 低频电路元件的测量实训（万用电桥的应用）

1. 实训目的

- (1) 学会万用电桥的使用；
- (2) 掌握低频电路元件的测量方法。

2. 实训设备

万用电桥、电阻器、电容器、电感器。

3. 实训内容

(1) 电阻器的测量

使用万用电桥测量电阻器，测量 5 个不同阻值的电阻器，将测量数据填入表 7-1 中。

表 7-1 电阻器测量数据

元 件 序 号	标称电阻值	测量电阻值	电阻值误差	相 对 误 差	所用量程倍率
1					
2					
3					
4					
5					

(2) 电容器的测量

使用万用电桥测量电容器，测量 5 个不同容量的电容器，将测量数据填入表 7-2 中。

表 7-2 电容器测量数据

元 件 序 号	标称电容量	测量电容量	电容量误差	损耗因数 D 值	所用量程倍率
1					
2					
3					
4					
5					

(3) 电感器的测量

使用万用电桥测量电感器，测量 5 个不同电感量的电感器，将测量数据填入表 7-3 中。

表 7-3 电感器测量数据

元 件 序 号	标称电感量	测量电感量	电感量误差	品质因数 Q 值	所用量程倍率
1					
2					
3					
4					
5					

实训 5.2 高频电路元件的测量实训（高频 Q 表的应用）

1. 实训目的

- (1) 学会高频 Q 表的操作使用；
- (2) 掌握高频电路元件的测量方法。



2. 实训设备

高频 Q 表、电容器、电感器。

3. 实训内容

(1) 电容器的测量

使用高频 Q 表测量电容器，测量 5 个不同容量的电容器，将测量数据填入表 7-4 中。

表 7-4 电容器测量数据

元 件 序 号	标称电容容量	测量电容量	电容量误差	损耗因数 D 值	所 用 频 率
1					
2					
3					
4					
5					

(2) 电感器的测量

使用高频 Q 表测量电感器，测量 5 个不同电感量的电感，将测量数据填入表 7-5 中。

表 7-5 电感器测量数据

元 件 序 号	标称电感量	测量电感量	电感量误差	品质因数 Q 值	所 用 频 率
1					
2					
3					
4					
5					

实训 5.3 半导体器件测量实训（半导体管图示仪的应用）

1. 实训目的

- (1) 学会半导体管图示仪的使用；
- (2) 掌握半导体分立器件的测量方法。

2. 实训设备

半导体管图示仪、半导体二极管、半导体三极管、场效应管。

3. 实训内容

(1) 半导体二极管的测量

半导体二极管的基本特性是单向导电性，所以通常需要测量其正、反向特性。半导体二极管有检波、整流、稳压管等各种类型，其性能和用途各不相同，但测试方法基本一样，下面以整流二极管 2CZ82 的参数测试为例，说明其测试方法。

① 正向特性的测试

测试前先将 X 、 Y 轴坐标零点移至左下角, 把二极管按图 7-29 所示接入测试台, 将各开关旋钮置于如下位置:

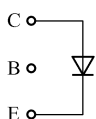


图 7-29 二极管的连接

峰值电压范围: $0 \sim 10\text{V} (+)$

功耗限制电阻: 250Ω

X 轴作用: 集电极电压 $0.1\text{V}/\text{度}$

Y 轴作用: 集电极电流 $1\text{mA}/\text{度}$

阶梯作用: 关

测试时逐渐调高峰值电压, 此时屏幕上可得到如图 7-30 所示的正向特性曲线。在此曲线的 Y 轴上 $I_F = 10\text{mA}$ 处所对应的 X 轴电压就是二极管正向压降 U_F , 约为 0.8V 。

② 反向特性的测试

测试前将 X 、 Y 轴坐标零点移至右上角, 二极管按图 7-29 所示接入测试台, 将各开关旋钮置于如下位置:

峰值电压范围: $0 \sim 500\text{V} (-)$

功耗限制电阻: $10\text{k}\Omega$

X 轴作用: 集电极电压 $20\text{V}/\text{度}$

Y 轴作用: 集电极电流 $1\mu\text{A}/\text{度}$

阶梯作用: 关

测试时逐渐调高峰值电压, 屏幕上得到如图 7-31 所示的反向特性曲线, 在此曲线的拐点 $-2\mu\text{A}$ 处所对应的 X 轴电压就是反向击穿电压 U_R , 约为 250V 。

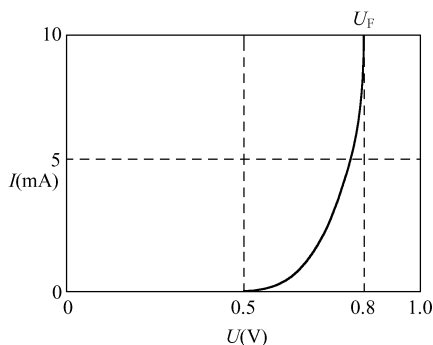


图 7-30 二极管的正向特性曲线

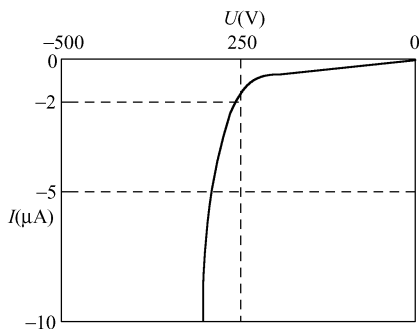


图 7-31 二极管的反向特性曲线

用半导体管图示仪测量 5 只不同型号的二极管, 将二极管的测量数据填入表 7-6 中。

表 7-6 二极管的参数测量数据

元件型号	反向漏电流	反向击穿电压	正向导通压降	正向导通电流
1				
2				
3				
4				
5				



(2) 半导体三极管的测量

半导体三极管按导电性分 PNP 和 NPN 两大类，它们只是使用的电压极性不同，其测试原理、测试方法基本相同。下面以 NPN 型三极管 3DG6 的测试为例，说明半导体三极管的测试方法。

① 输出特性曲线的测试

三极管的连接如图 7-32 所示，先将光点移至屏幕左下角作为坐标零点，并进行基极阶梯信号调零，然后将仪器的开关旋钮置于如下位置：

峰值电压范围：0 ~ 10V (+)

功耗限制电阻：250Ω

阶梯信号选择：0.02mA/级 (+)

阶梯作用：重复

X 轴作用：集电极电压 0.5V/度

Y 轴作用：集电极电流 1mA/度

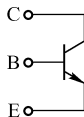


图 7-32 三极管的连接

测试时逐渐加大峰值电压，可得到如图 7-33 所示的输出特性曲线。调节基极阶梯信号的“级/簇”为 10，此时有 11 条曲线，读出 X 轴集电极电压 $U_{CE} = 1V$ 时的最上面一条曲线对应的集电极电流 I_C 和基极电流 I_B 值，由此可得：

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \bigg|_{U_{CE}=1V} = \frac{9.8mA}{10 \times 0.02mA} = 49$$

此时若把 X 轴作用开关放在基极电流或基极源电压处，可得到如图 7-34 所示的电流放大曲线，该曲线由多个光点组成。由此可得： $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$

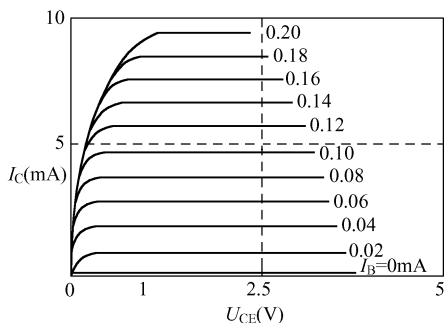


图 7-33 三极管的输出特性曲线

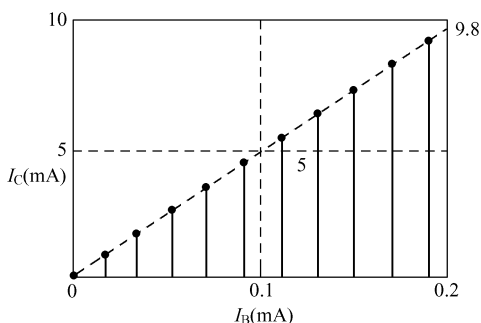


图 7-34 三极管的电流放大特性曲线

在测试中，由于半导体管的离散性较大，其特性曲线可能会超出屏幕坐标，此时可将 Y 轴作用开关置于较大挡位。由于特性曲线可以反映被测管特性的全貌，因此可依此对半导体管性能的优劣迅速做出判断。

② 输入特性曲线的测试

连接方法及调整同上，仪器的开关旋钮置于如下位置：

峰值电压范围：0 ~ 10V (+)

功耗限制电阻：100Ω

阶梯信号选择：0.1mA/级 (+)

阶梯作用：重复

X 轴作用：基极电压 0.1V/度

Y 轴作用：基极电流或基极源电压

测试时，逐渐加大峰值电压，可得到如图 7-35 所示的输入特性曲线。该曲线由多个光

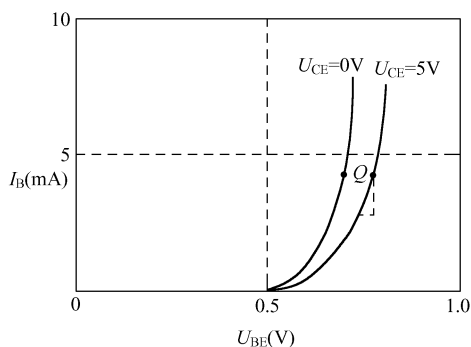


图 7-35 三极管的输入特性曲线

点组成。读出工作点 Q 处的基极电压 U_{BE} 和基极电流 I_B 值，可得到输入电阻为：

$$R_i = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE}=5V} = \frac{0.2 \times 0.1V}{(4-3) \times 0.1mA} = 200\Omega$$

③ 反向饱和电流和反向击穿电压的测试

反向饱和电流和反向击穿电压的定义及测量时的连接方法如表 7-7 所示。各不同参数的测量方法基本相同。

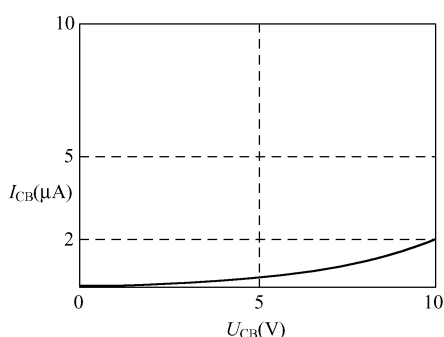
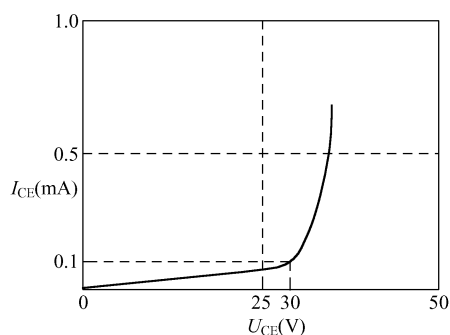
测试时，峰值电压范围应按被测管的测试条件选择，逐渐加大峰值电压，特别是在电流上升的陡峭段更要缓慢，功耗电阻取 $10 \sim 100k\Omega$ 之间的

的值，测试反向饱和电流时，Y 轴作用应置于灵敏度较高的 $10\mu A$ 挡位上，必要时可拉出 $\times 0.1$ 倍率开关。

表 7-7 三极管反向饱和电流和反向击穿电压的测量

反 向 电 流	击 穿 电 压	连 接 方 法
I_{CBO} : E 开路 B - C 间反向流	BV_{CBO} : E 开路 B - C 反向击穿电压	
I_{CEO} : B 开路 E - C 间反向流	BV_{CEO} : B 开路 E - C 反向击穿电压	
I_{EBO} : C 开路 E - B 间反向流	BV_{EBO} : C 开路 E - B 反向击穿电压	
I_{CES} : B - C 短路 C - E 间反向流	BV_{CES} : B - E 短路 C - E 反向击穿电压	
I_{CER} : B - C 串接电阻 R C - E 间反向流	BV_{CER} : B - E 串接电阻 R C - E 反向击穿电压	

例如测试时得到如图 7-36 或图 7-37 所示的特性曲线，由这些曲线上可读出反向饱和电流和反向击穿电压的值。此例 $I_{CBO} = 2\mu A$ ， $BV_{CEO} = 30V$ 。

图 7-36 反向饱和电流 I_{CB0} 曲线图 7-37 反向击穿电压 BV_{CEO} 曲线

对于 PNP 型三极管的测试与 NPN 型管的方法相似, 只是使用的测试电压极性相反, 测试时应先把光点调到屏幕的右上角, 作为坐标零点, 特性曲线处于第三象限。

测量 5 只不同型号的三极管, 将三极管测量数据填入表 7-8 中, 并画出特性曲线。

表 7-8 三极管的参数测量数据

元 件 型 号	I_{CB0}	BV_{CB0}	I_{CEO}	BV_{CEO}	β 值
1					
2					
3					
4					
5					

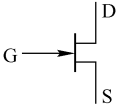
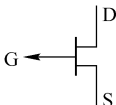
(3) 场效应管的测量

场效应管分为结型和 MOS 型两大类, 又分为 N 沟道和 P 沟道, 其中又分有增强型和耗尽型, 类型较多, 各种场效应管的符号、极性和特性曲线所处象限如表 7-9 所示。

表 7-9 场效应管的符号与极性

结 构 种 类	工 作 方 式	符 号	电 压 极 性		输 出 特 性 曲 线 所 处 象 限	转 移 特 性 曲 线 所 处 象 限
			V_G	V_D		
绝缘栅 N 沟道	耗尽型		-	+	I 象限	II 象限
	增强型		+	+	I 象限	I 象限
绝缘栅 P 沟道	耗尽型		+	-	II 象限	I 象限
	增强型		-	-	II 象限	II 象限

续表

结构种类	工作方式	符 号	电 压 极 性		输出特性曲线 所处象限	转移特性曲线 所处象限
			V_G	V_D		
结型 N 沟道	耗尽型		-	+	I 象限	II 象限
结型 P 沟道	耗尽型		+	-	II 象限	I 象限

用图示仪测试场效应管的各项参数时，主要是通过测试其输出特性曲线（漏极特性曲线）和转移特性曲线得到的。场效应管的测试方法与半导体三极管相似，由于场效应管是一种电压控制元件，故栅极输入的是电压。其漏极相当于三极管的集电极，栅极相当于基极，源极于相当发射极。下面以测试结型 N 沟道耗尽型场效应管 3DJ6 为例，说明其测试方法。

① 输出特性曲线的测试

由表 7-9 可知，3DJ6 的输出特性曲线位于第 I 象限，因此将光点移至屏幕的左下角。按图 7-38 所示把被测场效应管接入测试台，将仪器的各开关旋钮置于如下位置：

峰值电压范围：0 ~ 50V

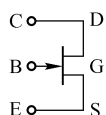


图 7-38 场效应管的连接

扫描电压极性：(+)

功耗限制电阻：1kΩ

X 轴作用：集电极电压 5V/度

Y 轴作用：集电极电流 1mA/度

阶梯作用：重复

阶梯信号选择：1V/度

阶梯信号极性：(-) 测试时逐渐调高峰值电压，屏幕上可得到图 7-39 所示的输出特性曲线，由此可得到：

- 饱和漏电流 I_{DSS} ：在 $U_{GS} = 0$ 的一条曲线上，X 轴上的电压 $U_{DS} = 10V$ 处，所对应的 Y 轴电流即为饱和漏电流 I_{DSS} ，此例 $I_{DSS} = 5mA$ 。
- 跨导 g_m ：当 U_{GS} 从 0 变到 -1V 时，所对应的漏极电流 I_D 从 5mA 变到 2.5mA，则

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \Big|_{U_{GS} = 10V} = \frac{5 - 2.5}{0 - (-1)} = 2.5S$$

- 击穿电压 BV_{DS} ：继续加大峰值电压，此时屏幕上最下面一条曲线出现转折处所对应的 X 轴电压即为 BV_{DS} ，此例 $BV_{DS} = 30V$ 。

② 转移特性曲线的测试

3DJ6 的转移特性曲线位于第 II 象限，将光点移至屏幕的右下角。将“X 轴作用”置于“基极电流或基极源电压”处，其余开关旋钮位置与测试输出特性曲线时相同。

测试时，逐渐调高峰值电压，可得到如图 7-40 所示的转移特性曲线，由此曲线得：

- 饱和漏电流 I_{DSS} ：转移特性曲线与 Y 轴的交点即为饱和漏电流，此例 $I_{DSS} = 5mA$ 。

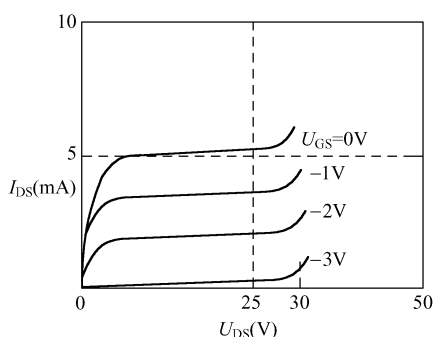


图 7-39 场效应管的输出特性曲线

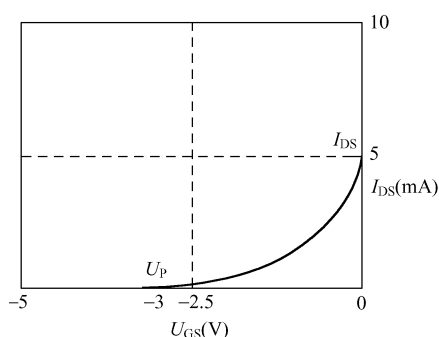


图 7-40 场效应管的转移特性曲线

- 夹断电压 U_P : 将 Y 轴作用置于 $10\mu\text{A}/\text{度}$, 在 $I_D = 5\mu\text{A}$ 所对应的 X 轴电压即为夹断电压, 此例 $U_P = -3\text{V}$ 。

测量 5 只不同型号的场效应管, 将场效应管测量数据填入表 7-10 中, 并画出特性曲线。

表 7-10 场效应管参数测量数据

元 件 型 号	饱和漏极电流 I_{DSS}	夹断电压 U_P	跨导 g_m	栅极击穿电压 BV_{GS}	漏极击穿电压 BV_{DS}
1					
2					
3					
4					
5					

本项目小结

1. 不同类型、不同用途的电子元器件, 需要使用不同的测量仪器进行测量。测量仪器按元器件的类型分类, 可分为无源电路元件测量仪器、半导体分立器件测量仪器、半导体集成电路测量仪器。

2. 万用电桥是一种利用电桥法在低频条件下测量电阻、电容和电感参数的交流阻抗电桥, 它是由测量桥体、音频振荡器、交流放大器和平衡指示表组成。可用来测量电阻值、电容量及损耗因数 (D 值), 电感量及品质因数 (Q 值), 测量准确度较高。

3. 高频 Q 表是一种利用谐振法在高频条件下测量元件参数的多功能仪器, 它是由高频振荡器、频率指示表、测量回路、 Q 值指示表组成。可用来测量电容量及损耗因数, 高频线圈的电感量及 Q 值, 电感线圈的分布电容, 高频回路的等效电阻及传输线的阻抗特性等参数, 虽然测量准确度不是太高, 但测量方式更符合元件的实际使用情况。

4. 半导体管特性图示仪是一种利用图示法来测量各种半导体器件参数的多功能仪器, 它是由基极阶梯电流发生器, 集电极扫描电压发生器, X 和 Y 轴放大器, 示波管及控制电路, 电源电路几部分组成。可用来测试半导体二极管、三极管、场效应管以及晶闸管的直流参数和低频参数, 观测直观方便。使用图示仪进行测试时, 仪器各开关旋钮的位置, 应按照被测半导体器件的测试条件或工作条件设置。

项目 7 思考题

1. 电子元器件如何分类？电子元器件的参数有哪些？
2. 电阻、电容、电感所需测量的参数主要有哪些？
3. 二极管、三极管、场效应管所需测量的参数主要有哪些？
4. 元器件测量仪器如何分类？主要有哪些类型？
5. 说明 Q 值和 D 值的物理意义，并写出其表达式。
6. 测量电桥可分为哪几种类型，电桥的平衡条件如何表达？
7. QS18A 型万用电桥由哪几部分组成？可测量哪些参数？
8. QBG-3B 型高频 Q 表由哪几部分组成？可测量哪些参数？
9. 半导体管特性图示仪由哪几部分组成？各部分作用是什么？
10. 半导体管特性图示仪可测量哪些器件的哪些参数？

项目 8 智能仪器和自动测量技术



本项目任务目标

1. 学习智能仪器的基本知识：应了解智能仪器的一般概念、智能仪器的功能特点、智能仪器的基本结构和工作原理；
2. 学习自动测试系统的知识：应了解自动测试系统发展过程、自动测试系统的组成、自动测试系统的总线结构；
3. 进行智能仪器的应用实训：通过训练熟悉智能仪器的性能，掌握智能数字电压表、数字存储示波器的测量使用技能。
4. 进行测试系统的应用实训：通过训练熟悉自动测试系统的构成，掌握简单温度测控系统的性能指标及其测试技能。

任务 1 知识引领——智能仪器简介

知识 1.1 智能仪器的一般概念

随着科学技术的进步、工业化大规模生产的加速，测试范围越来越广，测量任务越来越复杂，测试工作量急剧增加，对测试设备在功能、性能、测试速度、测试准确度等方面的要求也越来越高。而在某些场合需要进行长期定时测量或不间断测试，有时需要在危险环境下进行测试或在人员难以进入的区域测试。面对这种情况，传统的单机单参数人工测试已不能适应科技发展和测量任务的要求，迫切需要测量技术和测量仪器的改进与完善，因此智能仪器和自动测量技术应运而生。

智能仪器是计算机技术与电子测量仪器紧密结合的产物，是内含微型计算机或微处理器，能够按照预定的程序进行一系列测量测试的测量仪器，并具有对测量数据进行存储、运算、分析判断、接口输出及自动化操作等功能。

微处理器在测量仪器中的使用可以说是测量技术上的一大飞跃，是赋予仪器智能化的核心，增强了仪器的功能和灵活性，使原来要用许多硬件逻辑还难以解决或根本无法解决的问题用软件就可以解决。这使得电子测量在测量原理与方法、仪器设计、仪器性能与功能、仪器使用与故障检修等方面都发生了巨大变化。高性能、高精度、多功能的测量仪器已离不开

计算机技术。

为了实现智能化特性或功能,智能仪器中都广泛使用了嵌入式微处理器 (ARM) 或数字信号处理器 (DSP) 及专用集成电路 (ASIC), 并且以微处理器的软、硬件为核心, 将传统仪器的测量部分与微处理器有机地融合起来, 使得其功能大大丰富、性能大大改善、自动化及智能化程度大大提高。智能仪器大都具有自动量程转换、自动校准、自动程序化测量、自动故障诊断等能力, 并大都内置通用接口, 便于与计算机及不同种类、不同厂商的仪器连接构成自动测试系统。

知识 1.2 智能仪器的功能特点

仪器与微处理器相结合, 使用软件替代许多传统的硬件逻辑, 带来了更小的体积、更高的集成度、更直观方便和智能的显示与操作、更有效的数据存储处理与通信等优越性能。与传统仪器相比, 智能仪器具有以下几个突出特点。

(1) 以软件为核心, 具有强大的控制能力。智能仪器的全部操作都是在其内部微处理器软件的控制下进行的, 传统仪器中的传感器和变送器仅仅充当信息采集的前端, 其余工作全部由微处理器系统在软件的控制下完成。这样, 软件和微处理器系统就代替了许多传统仪器中的硬件, 如指针式显示、旋钮与按键开关、硬件判断逻辑、运算电路、计数器、寄存器、译码显示电路等。智能仪器使用智能接口进行人机对话, 使用者借助面板上的键盘和显示屏, 用对话方式选择测量功能、设置参数, 并通过显示器等直观地获得测量结果。这样不但降低了成本, 减小了体积, 提高了性能, 而且降低了功耗, 提高了可靠性, 同时通过软件更新还可提供新的功能, 易于改善性能, 实现仪器的升级。

智能仪器大都具有对外通信接口功能 (如软驱、串口、GPIB 标准接口等), 具有可编程的能力, 能够容易地与计算机及其他智能仪器组成自动测试系统, 有的甚至具有网络接口, 可接入 LAN 或 Internet, 实现异地遥控遥测, 完成更复杂的测试任务。

(2) 具有强大的数据存储和处理功能。智能仪器的另一突出特点就是它的数据存储和处理功能。智能仪器的存储器既用来存储测量程序、相关的数学模型以及操作人员输入的信息, 又用来存储以前测得的和现在测得的各种数据和处理结果等。而其强大的数据处理功能则主要表现在改善测量的精确度及对测量结果的处理两方面。

在提高测量精度方面, 智能仪器采用软件对测量结果进行及时的在线处理, 对各种误差进行计算和补偿, 所以精度和数据处理的质量都大为提高。例如, 传统的数字万用表只能测量电阻、交直流电压、电流等, 而智能型数字万用表不仅能进行上述测量, 而且还能对测量结果进行诸如零点平移、平均值、极值、方差、标准偏差、统计分析以及更加复杂的数据处理, 并可对信息进行分析、比较和推理。又如, 一些信号分析仪器在微型计算机的控制下, 不仅可以实时采集信号的实际波形, 在 CRT 上复现, 并可在时间轴上进行展开或压缩, 还可以对所采集的样本进行数字滤波, 将淹没在干扰信号中的有用信号提取出来, 也可以对样本信号进行时域的或频域的分析, 这样可使仪器具有更深层次的分析能力。

(3) 实现仪器功能多样化。利用微处理器, 智能仪器的性能得到提高, 功能得到扩展, 甚至可以进行一些传统仪器无法进行的测量, 使得智能仪器的测量过程、软件控制及数据处理等更多方面的功能易于实现。智能仪器对于测量所得的数据, 可以进行多种运算、比较、



逻辑判断等数据处理,然后再按要求输出显示。智能型 8520 数字万用表具有自检、零点设置、数值运算、偏差百分比、峰值、超极限检查、统计运算、用电平表示电压或功率等功能;有的智能仪器还具有时钟、日历、自动记录、绘制曲线、打印输出、报警及控制等多方面的功能。这样多的功能如果不用微型计算机控制,在一台仪器中是不可能实现的。通过软件更新,智能仪器的功能还能得到进一步的拓展。

智能仪器这种以微处理器及其软件为核心的结构,还可以把许多传统仪器的功能集成成一个多功能、高性能、多用途的综合性仪器,解决了一些应用场合对多种测量仪器的需求,减小了体积,降低了测量成本,简化了连接与操作,受到了测试人员的欢迎。典型的如无线通信测试领域广泛使用的 Agilent 公司的 892x 系列、IFR 公司的 296x 系列无线通信综合测试仪,它们集音频/射频/调制/扫频信号源、频谱分析仪、频率计、失真度仪、功率计、数字电压表/毫伏表、示波器、调制度分析仪、GSM/CDMA 协议分析仪、基站/手机测试仪等于一身,成为无线通信测试测量领域的首选仪器。

(4) 智能化、自动化程度高。在软件的控制下,智能仪器的智能化、自动化程度高。它能够通过自校准(校准零点、增益等)保证自身的准确度;能够自选量程、甚至自动选择和调整测试点和仪器的工作状态,简化使用人员的操作,省去了烦琐的人工调节。智能仪器还常常利用显示器向用户提供菜单用以指导操作,例如可以利用菜单向用户提示仪器可供选择的功能、可能的工作方式,指示操作步骤,引导选择各种参数,显示当前的量程和工作状态,指出操作或参数选择上的错误等。智能仪器还能够自动补偿、自适应外界的变化,如自动补偿环境温度、压力等对被测量的影响,能补偿输入信号的非线性,并根据外部负载的变化自动输出与其匹配的信号等;具有自检、自诊断和自测试功能。

仪器可对自身各部分进行检测,验证能否正常工作。自检合格时,显示正常信息或发出相应声音;否则运行自诊断程序,进一步检查、判定仪器的故障位置,显示相应的信息。若仪器中考虑了替换方案,还可在内部协调和重组,自动修复系统。

当测试测量过程步骤较多、较复杂时,可通过键盘或串口、GPIB 接口等编程设置,实现程控、自动化测量。这些都大大方便了使用,节省了测试时间,降低了测试强度。

知识 1.3 智能仪器的基本结构

智能仪器实际上是一个专用的微型计算机系统,它由硬件和软件两大部分组成,其基本结构如图 8-1 所示。

(1) 智能仪器的硬件结构

智能仪器的硬件部分主要包括 CPU、存储器、内部总线、各种 I/O 接口、通信接口、人机接口(键盘、开关、按钮、显示器)等电路,也可以由一个单片微型机组成。

智能仪器以微处理器系统为核心,通过内部总线及接口与仪器输入/输出通道、键盘显示及通信接口相连。输入通道是智能仪器与一般的计算机系统的显著区别之处,其前端部分与传统仪器的对应部分完全相似,包括输入放大/整形电路、抗混叠滤波器、多路转换器、采样保持器、A/D 转换器等部分,对于一些非电量的测量还包括传感器。对于输出通道,如果要求模拟输出,则需要与 D/A 转换器、多路分配器、X-Y 绘图仪或打印机相连,以获得硬复制,还可通过 GPIB 或 RS-232 等标准通信接口与计算机或自动测试系统进行通信。

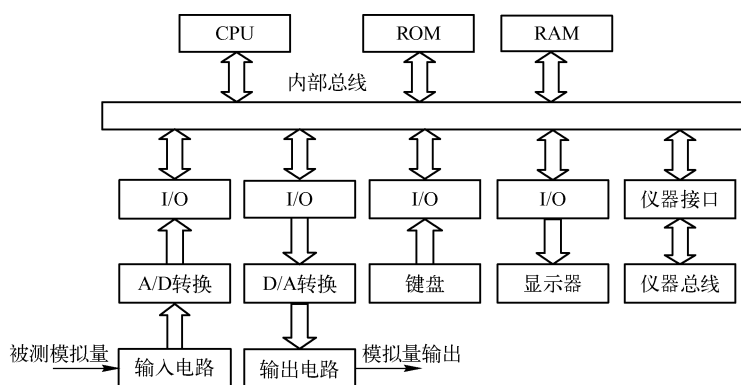


图 8-1 智能仪器的基本结构

人机接口是操作者与仪器之间进行交互的界面，主要由仪器面板上的键盘、开关、按钮及显示器等组成。键盘在微处理器管理和控制下工作，通过键盘，用户可以选择仪器功能和设置测量参数，有些仪器还可以通过键盘编程，使其从多方面灵活地满足用户的需要。

工作时微处理器接受来自键盘或 RS-232、GPIB 接口的命令，解释并执行这些命令；然后通过 I/O 接口发出各种控制信息给测量电路，用来设定测量功能，启动测量；测量数据被存储在内部的存储器中。当完成一次测量后，微处理器读取测量数据，进行必要的处理，最后输出至显示器、打印机、主控计算机、自动测试系统。

(2) 智能仪器的软件组成

智能仪器的软件是其灵魂，整个测量工作是在软件的控制下进行的。没有软件，智能仪器就无法工作，软件是智能仪器自动化程度和智能化程度的主要标志。智能仪器的软件部分主要包括监控程序和接口管理程序两部分。其中监控程序是核心，主要完成的功能有：通过键盘操作输入并存储所设置的功能、操作方式与工作参数；通过控制 I/O 接口电路对仪器进行预定参数的设置、实施数据采集；对数据存储器所记录的数据和状态进行各种处理；以数字、文字、图形等形式显示各种状态信息以及测量数据的处理结果等。接口管理程序面向通信接口，主要接收并分析来自通信接口的各种有关功能、操作方式与工作参数的程控操作指令，并通过通信接口输出仪器的现行工作状态及测量数据、处理结果等，通过联机、联网实现自动测试系统功能。

智能仪器中，软件代替了传统仪器中的许多硬件电路，如用 D/A 转换器和微处理器及其软件直接产生各种测量用信号，用软件直接完成频率计数和运算等，这不仅降低了仪器的成本、体积和功耗，增加了仪器的可靠性，还可以通过对软件的修改，使仪器对用户的要求做出灵活的反应，提高了产品的竞争力。因此，虽然智能仪器形式上完全是一台仪器，但实质上它与微型计算机有很多相似之处。

任务 2 知识引领——自动测试系统简介

以微处理器、计算机为核心，在程控指令的控制下，能自动完成某种测试任务而组合起来的测量仪器和其他设备的有机整体通常被称为自动测试系统。自动测量技术以计算机或嵌



入式微处理器为核心,将检测技术、数字信号处理技术、自动控制技术、通信技术、网络技术和电子信息等技术完美地结合起来,为电子测量技术注入了新的活力。

知识 2.1 自动测量技术的发展

为解决大规模、高精度、实时性、重复性测试,以及人工难以完成的测试工作,获得准确、高效的测试结果,随着计算机及数据通信技术在电子测量领域的成功普及和应用,20世纪70年代后期诞生了自动测试系统(ATS),其发展大致可分为三个阶段。

1. 第一阶段,单机及专用系统阶段

20世纪70年代初期,随着微电子技术和微处理器的普及,以及计算机技术与电子测量技术的结合,出现了以微处理器为基础的智能仪器。它具有键盘操作、数字显示、数据存储与简单运算等功能,可实现自动化测量。如智能化DVM、智能化RLC测量仪、智能化电子计数器、智能化半导体测试仪、智能化频谱分析仪等。在此基础上,为满足重复工作量大、可靠性要求高、测试速度要求快以及测试人员难于停留的场合的测试,诞生了早期的自动测量系统,也称为第一代自动测试系统。它往往是针对某项具体测试任务而设计的,缺乏仪器间的接口标准。仪器与仪器、仪器与计算机之间的接口问题是系统组建者为满足测试目标而自行设计解决的,如一些数据自动采集系统、产品自动检测系统、成分自动分析系统等。

与人工测量相比,这种自动测试系统具有很大的优越性,至今仍然在使用,但其最大的不足是适应性差,即缺乏通用性,当系统比较复杂、需要程控的仪器设备较多时,研制工作量大、费用高。

2. 第二阶段,标准接口总线阶段

进入20世纪70年代末期,标准化的通用接口总线出现了,因而可利用标准仪器系统总线将一台计算机和若干台电子测量仪器连接在一起,组成自动测试系统。在这种自动测试系统中,各设备都用标准化的接口和统一的无源总线以搭积木的形式连接起来。

在这些仪器总线中,最具代表性的是 GPIB 总线和 VXI 总线。GPIB 总线于 1972 年由美国惠普公司(HP, Agilent 公司的前身)推出,后为美国电气与电子工程师学会(IEEE)及国际电工委员会(IEC)接受,又称 IEEE-488 总线。

GPIB 总线以它的灵活、适用得到了广泛使用,成为测量仪器的基本配置,这些仪器既可以单独使用,也可以通过 GPIB 总线灵活方便地组成自动测量系统。

1987 年,惠普(HP)、泰克(Tektronix)等 5 家仪器制造商联合推出了新的通用接口总线 VXI,它是 VME 总线标准在仪器领域的扩展。VXI 总线系统像 GPIB 系统一样,可以把不同类型、不同厂商生产的插件(或称为模块、组件、插卡)式仪器等器件组成测试系统。VXI 系统广泛采用图形用户接口与开发环境,支持“即插即用”,以其小型便携、高速工作、灵活适用和性能先进等突出优点,显示了它充沛的生命力。经过十余年的发展,VXI 产品的生产厂商已达百家,产品超过千余种,应用系统上万套,广泛应用于通信、航空、电子、汽车、医疗等设备的测试。

3. 第三阶段,计算机仪器阶段

进入 20 世纪 80 年代,计算机特别是个人计算机得到了广泛的普及与应用。在电子测量

领域,计算机与仪器之间的相互关系也在发生改变。在早期的自动测量系统中,仪器占据主要位置,而计算机起辅助作用;而到了 GPIB 仪器和 VXI 仪器阶段,计算机系统越来越占据主要地位。基于这种趋势,出现了“计算机即是仪器”的测试仪器新概念,诞生了个人仪器和虚拟仪器。

个人仪器以个人计算机为核心,辅以仪器电路板和扩展箱,与个人计算机内部总线相连,在应用软件的控制下,共同完成测试测量任务。强有力的计算机软件代替了传统仪器的某些硬件,计算机直接参与测试信号的产生和测量特性的分析,这样仪器中的一些硬件从系统中消失了,从而大幅降低了仪器的成本,缩短了研制周期,方便了升级更新,在组成测试系统和网络方面有很大的潜力。

1986 年,美国国家仪器公司(NI)提出了一种新型的仪器概念——虚拟仪器。虚拟仪器的出现和兴起是电子测量仪器领域的一场重要变革,它是一种与传统电子测量仪器完全不同的概念,改变了传统仪器的设计理念、模式和结构。在虚拟仪器中,计算机处于核心地位,计算机软件和测试系统更紧密地结合成了一个有机整体,利用计算机强大的图形环境,建立界面友好的虚拟仪器面板(即前面板),操作人员通过友好的图形界面及图形化编程语言控制仪器运行,就能完成对被测量量的采集、分析、判断、显示、存储及数据处理。

虚拟仪器技术的实质是充分利用最新的计算机技术来实现和扩展传统仪器的功能。虚拟仪器的基本构成包括计算机、虚拟仪器软件、硬件接口模块等。在这里,硬件仅仅是为了解决信号的输入/输出,软件才是整个系统的关键。当基本硬件确定以后,就可以通过不同的软件实现不同仪器的测试测量功能。虚拟仪器的应用软件集成了仪器所有的采集、控制、数据分析、结果输出和用户界面等功能,使传统仪器的某些硬件乃至整个仪器都被计算机所代替,从某种意义上体现了“计算机即是仪器”的概念。

随着互联网技术在电子测量领域的应用,进一步改变了测量技术的以往面貌,打破了在同一地点进行采集、分析和显示的传统模式,实现了分布式测量及资源共享,标志着自动测试与电子测量仪器领域中技术发展的一个崭新方向。

知识 2.2 自动测试系统的组成

通过统一的无源标准总线,自动测试系统把不同厂家生产的各种型号的通用仪器及计算机,以组合式或积木式的方法连接起来,在预先编写的测试程序的统一控制下,自动完成整个复杂的测试工作。这种积木化的组建方式简化了自动测试系统的组建工作,因而得到了广泛应用,自动测试系统已成为现代测试技术中,智能化和自动化程度高、测量准确度高、工作效率高的代表。

自动测试系统的组成如图 8-2 所示,一般包括以下五部分。

(1) 系统控制器 主要是计算机,如小型机、个人计算机、微处理器、单片机等,它是系统的指挥与控制中心。

(2) 程控仪器设备 包括各种程控仪器、程控激励源、程控开关、程控伺服系统、执行元件,以及显示、打印、存储记录等器件,能完成一定的具体的测试和控制任务。

(3) 总线与接口 是连接控制器与各程控仪器、设备的通路,能完成消息、命令、数据的传输与交换,它包括插卡、插槽及电缆等。



(4) 测试软件 为了完成系统测试任务而编制的、在控制器上运行的各种应用软件，如测试主程序、驱动程序、数据处理程序，以及输入/输出接口软件等。

(5) 被测对象 随着测试任务的不同，被测对象往往是千差万别的。被测对象由操作人员通过测试电缆，接插件、开关等与程控仪器和设备相连。

图 8-2 所示为典型的电压和频率参数的自动测试系统，采用带 GPIB 接口的通用计算机作控制器，用带 GPIB 接口的频率计、数字多用表、频率合成器作测量设备，它们预先分配了不同的地址。在计算机上运行编制好的测试程序，首先设定频率合成器的各种功能，并启动工作，让它输出所要求的幅度和频率信号，加到被测器件上，然后控制数字多用表和频率计对被测器件输出信号的幅度和频率进行测量，最后将测量数据送到计算机。

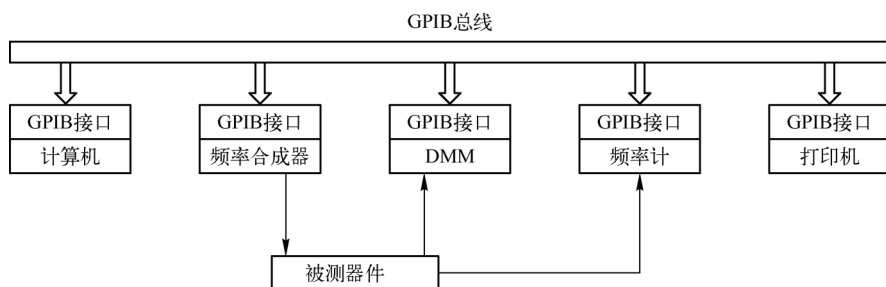


图 8-2 典型 GPIB 自动测试系统

知识 2.3 自动测试系统的总线

自动测试系统通过开放的标准化的仪器总线，将不同种类、不同厂家的仪器设备及计算机积木化地组合在一起，完成测试命令、测试数据、测试状态的传递。自动测试系统常用的总线有 GPIB 总线、VXI 总线、PXI 总线等。

1. GPIB 总线

GPIB 通用接口总线（General Purpose Interface Bus）又称 IEEE-488 总线，是在 1972 年由美国 HP 公司首先提出的，定名为 HP-IB。以后陆续为美国电气与电子工程师学会（IEEE）及国际电工委员会（IEC）接受，并正式颁发了标准文件。作为国际通用的仪器接口标准，目前生产的智能仪器几乎无一例外地都配有 GPIB 标准通用接口。它实现了仪器仪表、计算机、各种专用的仪器控制器和自动测试系统之间的快速双向通信，不但简化了自动测量过程，而且为设计和制造自动测试装置（ATE）提供了有力的工具。

GPIB 总线适用于电器干扰轻微的实验室和生产现场。通过 GPIB 总线可将总数不超过 15 台的仪器设备、计算机按串联或星形的形式连接起来，以组成一个自动测试系统。互连总线的长度不超过 20m。总线上数据采用并行比特（位）双向异步方式传输，其最大传输速率不超过 1Mbps。

总线上传递的各种信息统称为消息。由于带标准接口的智能仪器按功能可分为仪器功能和接口功能两部分，因此消息也有仪器消息和接口消息之分。所谓接口消息，是指用于管理接口部分、补偿各种接口功能的信息，又称为命令，它由控者发出而只被接口部分所接收和使用，如总线初始化、对仪器寻址、设置仪器工作方式等。仪器消息是与仪器自身工作密切

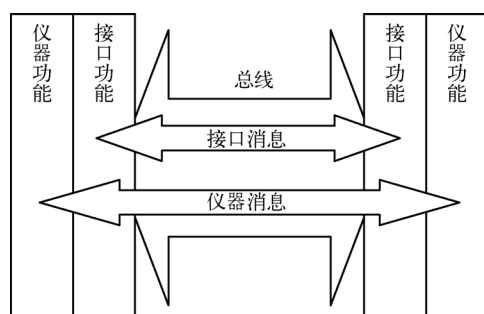


图 8-3 接口消息和仪器消息的传递

相关的信息，又称为数据，它只被仪器部分所接收和使用，如编程指令、测量结果、机器状态和数据文件等。虽然仪器消息通过接口功能进行传递，但它不改变接口功能的状态。接口消息和仪器消息的传递如图 8-3 所示。

在一个 GPIB 标准接口总线系统中，要进行有效的通信联络，至少应有“讲者”、“听者”、“控者”三类仪器设备，控者、讲者、听者被称为系统功能的三要素，GPIB 标准接口总线系统结构与连接如图 8-4 所示。

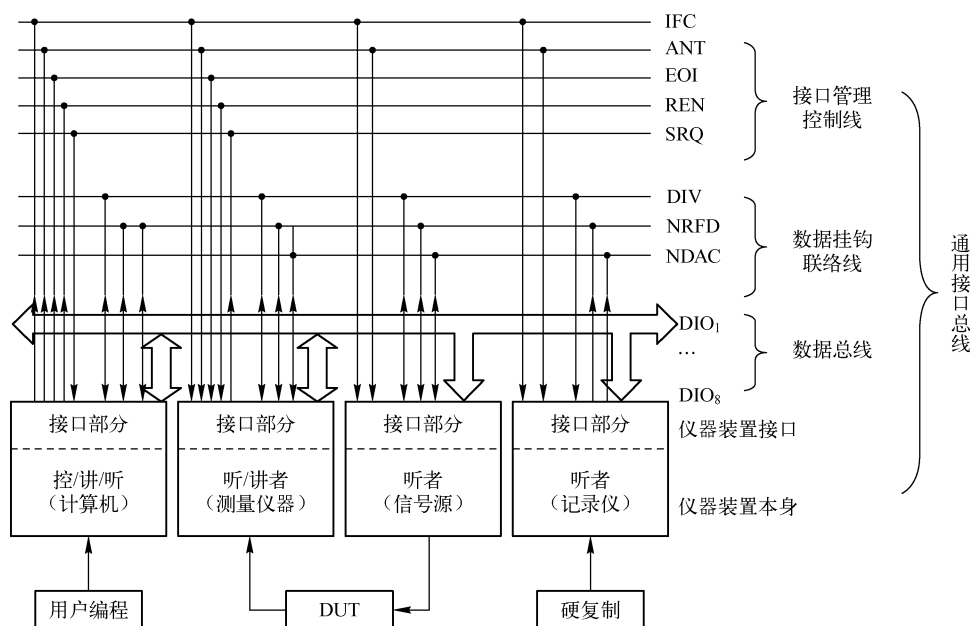


图 8-4 GPIB 标准接口总线系统结构与连接

讲者是通过总线发送仪器消息的装置（如计算机、数据采集器、测量仪器等）。在一个 GPIB 系统中，可以设置多个讲者，但在某一时刻，只能有一个讲者在起作用。听者是通过总线接收由讲者发出消息的仪器装置（如打印机、信号源等），在一个 GPIB 系统中，可以设置多个听者，并且允许多个听者同时工作。控者是数据传输过程中的组织者和控制者，如对其他设备进行寻址或允许讲者使用总线等，通常由计算机担任，GPIB 系统不允许有两个或两个以上的控者同时起作用。

控者除了要控制管理接口系统外，还要与系统内各有关设备交换测量数据等消息，所以这一类担任控者的设备一般要能控、能讲也能听，如 GPIB 系统中的计算机。系统内另一类设备要能讲，也能听，如数字电压表，它有时需要作为听者接受控者设备发来的程控指令，有时又要作为讲者把测得的电压值送给打印机、计算机等。第三类设备则只需要听，不需要讲，如打印机和绘图仪等。

GPIB 总线上的设备通过不同的地址来进行区分。采用单字节地址时，支持 31 个讲地



址、31 个听地址；采用双字节地址时，支持 961 个讲地址、961 个听地址。GPIB 总线仪器覆盖范围广（从比较便宜的到非常昂贵的），但是 GPIB 总线数据的传输速度一般低于 500 Kbps，因而不适用于对系统速度要求较高的场合。

2. VXI 总线

为了适应测量仪器从分立的台式和机架式结构向小型化、便携化、模块化方向发展，以满足对更高的测试速度、更灵活高效的低成本的测试需要，一些著名的测试和测量公司于 1987 年联合推出了一种新的、完全开放的、适用于多供货厂商环境的模块式仪器总线标准——VXI 总线结构标准。它将测量仪器、主机架、固定装置、计算机及软件集为一体，集中了智能仪器、个人仪器和自动测试系统的很多特长，其性能全面优于 IEEE-488 总线系统，而且使自动测试系统的尺寸大大缩小，测试速度大大提高，可满足目前自动测试系统向标准化、自动化、智能化、模块化及便携式方向发展的要求，被称为新一代仪器接口总线，标志着测量技术和仪器系统正进入一个崭新的阶段。

VXI 总线来源于 VME 总线结构，是 VME 总线在仪器领域的扩展。VME 总线是一种非常好的计算机底板结构，与必要的通信协议相配合，其数据速率可达 40Mbps。用这样的总线结构来构成高吞吐量的仪器系统是非常理想的。

VXI 总线在系统结构及软、硬件开发技术等各方面都采纳了新思想及新技术，有以下几点主要特点。

(1) 测试仪器模块化。VXI 系统的全部器件都采用插件式结构，插入以 VME 总线作为机箱主板总线的机箱内，插件和供插入插件的主机架尺寸满足严格的要求。VXI 总线仪器主机结构如图 8-5 所示。采用 VXI 总线的测试系统最多包含 13 个器件，这大体上相当于一个普通的 GPIB 系统，但是多个 VXI 子系统可以组成一个更大的系统。在一个子系统内，电源和冷却散热装置为主机内的全部器件所公用，从而明显提高了资源利用率。

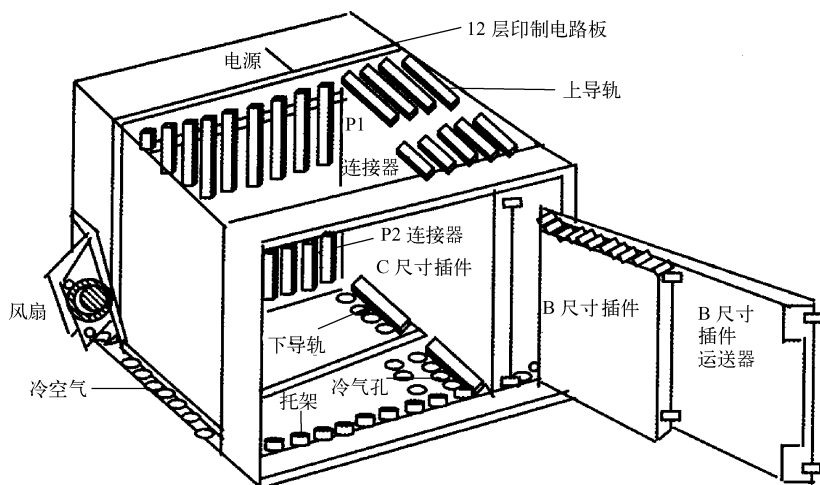


图 8-5 VXI 总线仪器主机结构图

(2) 具有 32 位数据总线，数据传输速率高。主板总线在功能上相当于连接独立仪器的 GPIB 总线，但具有更高的传输速率，控制器也能做成插卡挂接在主板总线上进行总线上各种活动的调度和控制，基本总线数据传输速率为 40Mbps，远远高于其他测试系统总线的数

据传输速率。除了使用数据总线外，VXI 系统中还可使用本地总线传输数据，它是一种链式总线结构，主机上每个插槽都有一组与相邻槽口之间相连的（特性阻抗为 50Ω ）短线，一组通向左侧插槽，一组通向右侧插槽，可在相邻插件间传递数据，而不需要用公用数据总线来传送数据。由于本地总线极短，故在 VXI 系统中其数据传输速率最高可达 1Gbps。

(3) 可靠性高，可维修性好。用 VXI 总线组建的系统结构紧凑、体积小、重量轻，简化了连接和控制关系，有利于提高系统的可靠性和可维修性。VXI 总线 C 尺寸主机箱平均无故障时间 (MTBF) 高达 1 万小时，VXI 总线模块仪器的 MTBF 一般可做到几万至十几万小时，基本系统的 MTBF 可达 6000 小时。模块化结构与系统强大的自检能力使得可维修性大大提高，一般系统的平均恢复时间 (MTTR) 小于 15min。

(4) 电磁兼容性好。在 VXI 总线的设计和标准的制定中，充分考虑了系统的供电、冷却系统和电磁兼容性能，以及底板上信号的传输延迟及同步等，对每项指标都有严格的标准。全部 VXI 总线集中在高质量、多层印制电路板内，这就保证了 VXI 总线系统的高精度及运行的稳定性和可靠性；而且频带宽，现已有从直流到微波的各种仪器模块。

(5) 通用性强，标准化程度高。VXI 总线不仅硬件进行了标准化，而且软件也进行了标准化。软件的可维护性与可扩充性好，这也是 VXI 总线优于其他总线、得到迅速发展的一个重要因素。

(6) 适应性、灵活性强。VXI 总线有 A、B、C 三种规格的机箱和 A、B、C、D 四种规格的模块供用户选择；支持 8 位、16 位、24 位和 32 位的数据传输。系统组建者可根据需要选择不同厂家、不同种类的器件进行组合，灵活方便地组建适应性极强的自动测试系统。为了充分利用资源，VXI 总线开发了与其他总线系统连接和转换的模块，这使得 VXI 总线系统具有巨大的包容性，可与任何总线的仪器或系统联合工作。

VXI 系统是计算机控制下的一种自动测试系统。在很多情况下，主机架上的插件仪器由主机架外的主控计算机进行控制。这时，主机架内各仪器可借助于主计算机的键盘和 CRT 进行人机交互控制和显示，在 CRT 上显示通过软件形成的“虚面板”。主机架外的控制计算机通常是个人计算机，也可以通过局域网接受计算机工作站或远程的主计算机控制，这为组成更大的测试网络提供了可能。这种测试网络使测试不再是单纯地提供数据，而是与计算机网络相互配合，构成集信息的采集、交换和处理为一体化的大型应用系统，使信息变成一种决策工具。

插件式仪器当中也常包含微处理器，很多控制和处理工作可由主机架内的微型计算机完成，从而减少了与主机架外主控计算机的信息交换，大大提高了数据采集与处理能力。主机架内部可以是单 CPU（通常置于零槽插件内），也可以是多 CPU 分布式系统，还可以组成分级仪器系统，由主计算机指挥具有智能功能的命令者插件，再由它们指挥从属者插件，形成树状分布结构。

图 8-6 所示是选用 C 型主机架的 HP75000 VXI 仪器系统示意图。

外部控制器采用一台个人计算机，通过 GPIB 总线（或 RS-232C、MXI、VME 总线等）与主机架相连接。VXI 总线和其他总线之间需要有翻译器，它一般都放在主机架最左边的特定插槽内，即零号插槽内，主要承担 VXI 系统资源管理以及 GPIB 总线与 VXI 总线间的转换；其他插槽中的每一个仪器和设备都是 VXI 总线仪器模块，其最多可以插放 13 个标准宽度的模块。有的一个模块即构成一种仪器，有的仪器则需要用两个模块来构成（如本例中的数字设备）。与个人计算机相连的 GPIB 总线还可以方便灵活地接至其他 VXI 系统或其他

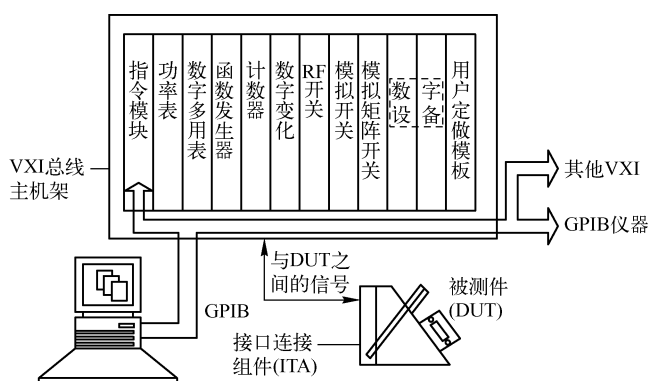


图 8-6 HP75000 VXI 仪器系统示意图

仪器系统。本系统可以同时进行多种测试，来自各种仪器的信号经各种电子转换开关送到接口连接组件板（ITA），再接到被测设备上。这种组件板被称为接口适配器，具有很强的适应性，只要改变一下内部的适配器和软件，便可测试各种电子产品。

VXI 总线实现了测试系统的模块化、系列化、通用化以及仪器的互换性和互操作性。但是 VXI 总线仪器的价格相对较高，适合于复杂的、高尖端的测试领域。

3. PXI 总线

PXI 总线标准是美国国家仪器（NI）公司于 1997 年推出的测控仪器总线标准，它是目前广泛使用的 PCI 计算机局部总线（IEEE1014 - 1987 标准）为基础模块仪器结构，目标是在 PCI 总线基础上提供一种技术优良的模块仪器标准。

(1) PXI 总线的特点

PXI 总线是 PCI 总线的增强与扩展，并与现有工业标准 Compact PCI 兼容。作为一种开放的仪器结构，它在相同插件底板中提供不同厂商的互连与操作，以比较低的价格获得了高性能模块仪器，是 VXI 以外的另一种选择。

与 VXI 总线类似，PXI 总线也采用标准机架式结构，可在一个 PXI 机架上插入 8 块插卡（1 个系统模块和 7 个仪器模块），而且可以通过 M 公司的多系统扩展接口 MXI - 3，以星形或菊花形连接多个 PXI 机箱，来延长控制距离，扩大 PXI 的应用范围。系统的主控制器既可以是外部的 PC、工作站，也可以是内嵌式控制器。

PXI 总线由于利用了商品化的 PC 和总线技术，故 PXI 仪器能够提供自动测试设备独具的高性能，同时具有尺寸小、成本低以及灵活易用等特点，适用于众多领域，如现场测量和高档制造测试领域等。

(2) PXI 软件特性

为了充分发掘 PXI 在提供高度集成化的测控平台方面的潜力，PXI 总线选用开放式软件体系结构，用以定义出一个与不同类型硬件相连的公共接口，以实现工业应用。

为降低 PXI 自动测试系统软件的开发难度与复杂度，PXI 标准要求所有的厂商都要为自己开发的测试仪器模块开发出相应的软件驱动程序，从而使用户从烦琐的仪器驱动程序工作中解脱出来。PXI 同样要求外部设备模块或者机箱的生产厂商提供其他必要软件。例如，完成定义系统设置和系统性能的初始化文件必须随 PXI 组件一起提供。这些文件提供了利用操

作软件如何正确配置系统的信息，如两个相邻的模块是否具有匹配的局部总线信息等。如果没有这些文件，则不能实现局部总线的功能。另外，虚拟仪器软件体系结构已经广泛应用于计算机测试领域，PXI 规范中已经定义了 VXI、GPIB、USB 等的设置和控制，以实现虚拟仪器软件体系结构。

选择哪种总线技术是用户在组建测控系统时首先遇到的问题，这取决于具体的应用，取决于应用项目的复杂程度、要求的测试速度及用户的成本预算等。从价格上考虑，优先选择 PXI 系统；而对于更大型、更复杂、要求测试速度更高的应用，可选择 VXI 系统。目前，以 GPIB 总线为特征的智能仪器、以 VXI 总线和 PXI 总线为特征的模块式仪器，以及新诞生的虚拟仪器，三者互为补充、共同发展。

任务 3 应用实训——智能仪器应用实训

实训 3.1 智能数字电压表使用实训

1. 实训目的

1. 了解智能数字电压表的基本功能；
2. 掌握智能数字电压表的使用方法。

2. 实训设备

HG-1850 型智能数字电压表、可调直流稳压电源。

3. 实训内容

(1) 智能数字电压表的基本功能

HG-1850 型 DVM 面板的键盘如图 8-7 所示。键盘分为上、下两排，每排十二只按键，每个按键上方都设有一只 LED 指示该按键是否有效。

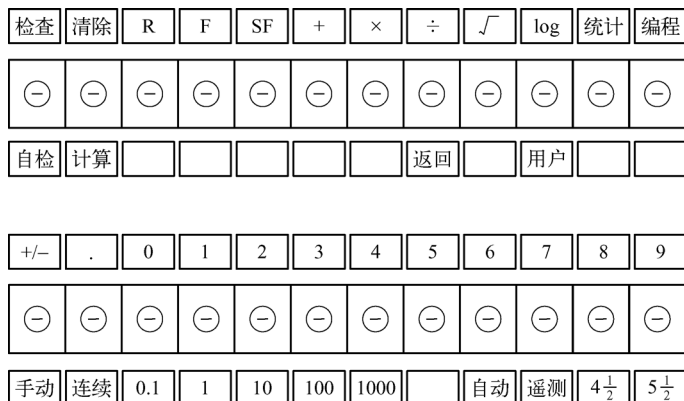


图 8-7 HG-1850 型 DVM 面板键盘图



当仪器在测量模式下时,每个按键下方的标号表示该键的意义,下面分别说明。

①“手动”和“连续”键 为互锁键,当“连续”被按下而有效时,测量自动连续进行,即每测量一次显示读数就自动更新一次。当“手动”键被按下而有效时,显示器的内容将随每次按动“手动”键而更新,若不按动该键,显示器的内容将不予更新。

②量程选择键 为互锁键,用于选择测量量程,“0.1”(0.1V量程)、“1”(1V量程)、“10”(10V量程)、“100”(100V量程)、“1000”(1000V量程)以及“自动”(自动量程转换)。

③“遥测”键 为自锁键,该键按下时,指示灯亮,前面板上的其他键均无效,这时从后面板接入键盘将能实现遥控。若再按一次此键,指示灯灭,前面板各键重新生效。

④显示位数键 为互锁键,当“4½”键按下时显示位数为四位半,测量速度快;当“5½”键按下时显示位数为五位半,但测量速度减慢。

⑤“自检”键 按下后,仪器脱离测量模式进行自检。

⑥“计算”键 为自锁键。当用户编制了计算程序以后,按动此键,指示灯亮,就能按照所编程序对测量结果进行处理并显示处理的结果,如果再按一次此键,指示灯灭,显示器仅显示测量结果。

⑦“用户”键 为自锁键。按下后仪器进入用户程序。用户程序已固化在仪器内部。

⑧“编程”键 当按下仪器右上角的“编程”键时,仪器进入编程模式。此时,每个按键上方的标号表示该键在编程模式下的功能,下面分别说明:

- “检查”键 用于检查或修改程序。连续按动此键时,显示器将依次显示所编程序每一步的内容。
- “清除”键 用于清除刚从键盘上送入的数据。
- “R”键 用于直接显示测量结果。
- “F”键 用于显示在RAM区开辟的中间寄存器中的内容。
- “SF”键 代表向寄存器F存数。
- “+”、“-”、“×”、“÷”、“√”、“log”键分别代表加、减、乘、除、开方和对数运算。
- “0”、“1”…“9”、“+/-”、“.”等键供编程时输入各种数据、正负号和小数点用。

在每次编程之后还需按下“编程”键,此时显示器显示“HI”,向用户询问对测量结果有无上限要求。若有就可以通过键盘送入上限值。这时再按下“编程”键,显示器显示“LO”,用户可打入下限值。如无要求只要不送数即可。上、下限值设置完毕后再按一次“编程”键,显示器上显示“End”,表示编程全部结束,随即返回测量模式。

(2) 应用编程进行数据处理

HG-1850型DVM可以利用键盘编制各种应用程序,以对测量数据进行处理。

设某热电偶传感器的输出电压 U 与其测量温度 T 存在如下关系:

$$T = 4.4 + 7.6U + 3.8U^2 + 0.2U^3$$

应用HG-1850型DVM对电压 U 进行测量和处理,实现对温度 T 的直接读数。

为了编程方便,可先将上式变换为:

$$T = 0.2 \{ [(U + 19)U + 38]U + 22 \}$$

然后就可以通过键盘编制计算程序。编程的操作顺序与显示器的响应如表8-1所示。在显示器上显示“End”约1s后,便返回测量模式,显示器上将直接读出 T 的数值。

表 8-1 编程的操作顺序与显示器的响应

顺 序	按 键 号	显示器的响应	顺 序	按 键 号	显示器的响应
1	编程	PRO	12	R	RES
2	R	RES	13	+	Add
3	+	Add	14	2	2
4	1	1	15	2	22
5	9	19	16	×	HUL
6	×	HUL	17	.	0.
7	R	RES	18	2	0.2
8	+	Add	19	统计	St0
9	3	3	20	编程	HI
10	8	38	21	编程	LO
11	×	HUL	22	编程	End

实训 3.2 数字存储示波器使用实训

1. 实训目的

- (1) 了解数字存储示波器的基本功能；
- (2) 掌握数字存储示波器的使用方法。

2. 实训设备

DS3062B 型数字存储示波器、函数信号发生器。

3. 实训内容

1) DS3062B 型数字存储示波器的面板操作

DS3062B 型数字存储示波器的外形如图 8-8 所示。



图 8-8 DS3062B 型数字存储示波器的外形图

DS3062B 型数字存储示波器的面板如图 8-9 所示，按操作功能可分为以下几个区域。

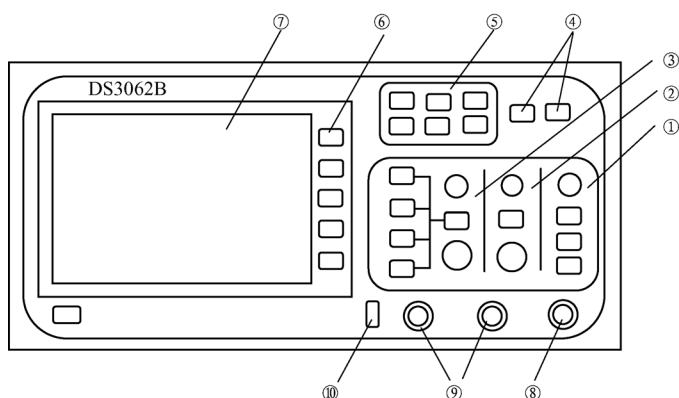


图 8-9 DS3062B 型数字存储示波器面板图

(1) 垂直系统控制区 (VERTICAL)

- ① POSITION (垂直位移旋钮): 控制信号在波形窗口的垂直显示位置;
- ② SCALE (旋钮): 用于改变 “Volt/div (伏/格)” 垂直挡位设置;
- ③ 通道操作菜单: CH1: 通道 1; CH2: 通道 2; MATH: 数学运算; REF: 参考波形。
- ④ OFF: 关闭操作菜单。

(2) 水平系统控制区 (HORIZONTAL)

- ① POSITION (水平位移旋钮): 控制信号在波形窗口的水平显示位置;
- ② SCALE (微调旋钮): 调节可改变 “s/div (秒/格)” 水平挡位设置, 按下可以切换到 Ultra Zoom (缩放模式);

③ MENU: 显示 TIME 菜单, 设置水平 POSITION 旋钮的触发位移或内存位移模式;

④ 触发位移: 调节 POSITION 旋钮, 水平移动触发点;

⑤ 内存位移: 调节 POSITION 旋钮, 在 16K 的内存中水平移动当前显示的波形窗口。

(3) 触发系统控制区 (TRIGGER)

① LEVEL: 改变触发电平设置, 转动旋钮, 屏幕上出现触发线以及触发标志。

② MENU: 用于调出触发操作菜单;

a. 按 1 号菜单按键, 选择边沿触发或视频触发;

b. 按 2 号菜单按键, 选择边沿类型;

c. 按 3 号菜单按键, 选择信源;

d. 按 4 号菜单按键, 选择触发方式;

e. 按 5 号菜单按键, 选择耦合方式;

③ 50%: 用于设定触发电平在触发信号幅度上的垂直中点;

④ FORCE: 用于强制产生一个触发信号, 主要用于触发方式中的 “普通” 和 “单次” 模式。

(4) 立即执行键

① AUTO (自动设置): 当被测信号连接到信号输入通道, 按下此按钮, 示波器将自动设置垂直、水平和触发等各项控制;

② RUN/STOP (运行/停止): 运行/停止波形采样。

(5) 功能键（共有 6 个）

① MEASURE：自动测量功能键，使用此按钮可以弹出自动测量操作菜单，通过菜单控制按钮选择自动测量方式；

② ACQUIRE：采样系统功能键，使用此按钮可以弹出采样设置菜单，通过菜单控制按钮调整采样方式；

③ STORAGE：存储系统功能键，使用此按钮可以弹出存储设置菜单，通过菜单控制按钮设置存储/调出波形；

④ CURSOR：光标测量功能键，使用此按钮可以弹出光标测量设置菜单，通过菜单控制按钮选择光标测量方式（如光标模式、光标类型和信源选择）；

⑤ DISPLAY：显示系统功能键，使用此按钮可以弹出显示设置菜单，通过菜单控制按钮调整显示方式；

⑥ UTILITY：辅助系统功能键，使用此按钮可以弹出辅助系统功能设置菜单，通过菜单控制按钮设定辅助系统功能（如自校准、接口设置、探头校准频率、自测试、语言等）。

(6) 菜单操作键

有 5 个灰按钮，可以设置当前菜单的不同选项。

(7) 显示屏幕

(8) 外触发信号输入插口

(9) Y1 和 Y2 信号输入插口

(10) 探头补偿器

2) DS3062B 型数字存储示波器的显示界面

DS3062B 型数字存储示波器显示界面说明如图 8-10 所示。

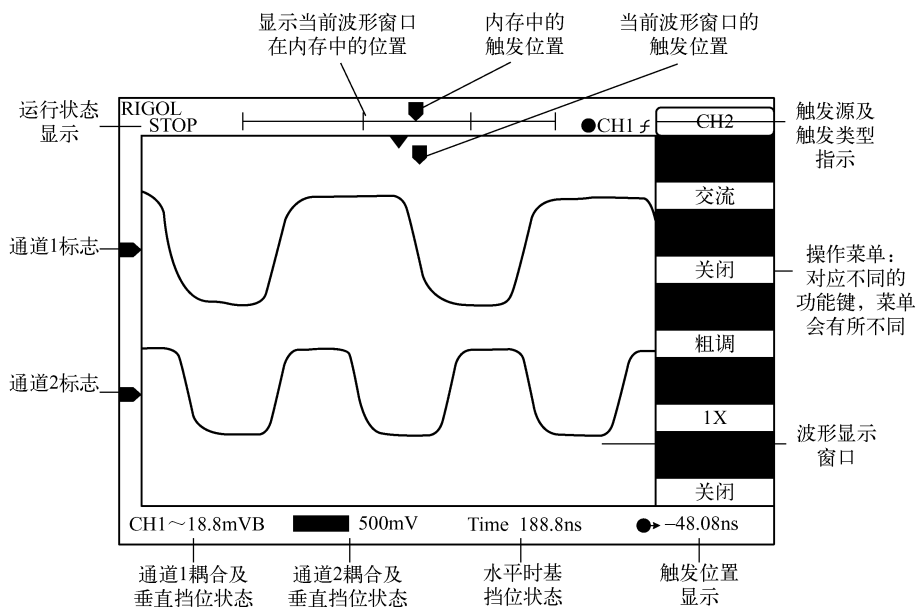


图 8-10 DS3062B 型数字存储示波器显示界面说明



示波器在使用时要进行垂直系统、水平系统、触发系统、采样方式、自动测量、标测量、显示方式、存储/调出、辅助系统等设置,下面以垂直系统 CH1 通道的设置举例说明其使用方法。

示波器的每个通道有独立的垂直菜单,每个项目都按不同的通道单独设置,下面仅介绍 CH1 通道的设置。

按 CH1 功能键,系统显示 CH1 通道的操作菜单,如表 8-2 所示。

表 8-2 CH1 通道的操作菜单

功 能 菜 单	设 定	说 明
耦合	交流 直流 接地	阻挡输入信号的直流成分 允许输入信号的交流和直流成分通过 断开输入信号
带宽限制	打开 关闭	限制带宽至 20MHz,以减少显示噪声 满带宽
挡位调节	粗调 微调	粗调按 1-2-5 进制设定垂直灵敏度 微调在粗调设置范围之间进一步细分,以改善分辨率
探头	$1 \times 10 \times$ $100 \times 1000 \times$	根据探头衰减因数选取其中一个值,以保持垂直标尺读数准确
反相	打开 关闭	打开波形反相功能 波形正常显示

① 设置通道耦合。当被测信号是一个含直流偏置的正弦信号,操作步骤如下:

a. 按 CH1→耦合→交流,设置为交流耦合方式,波形显示如图 8-11 所示;

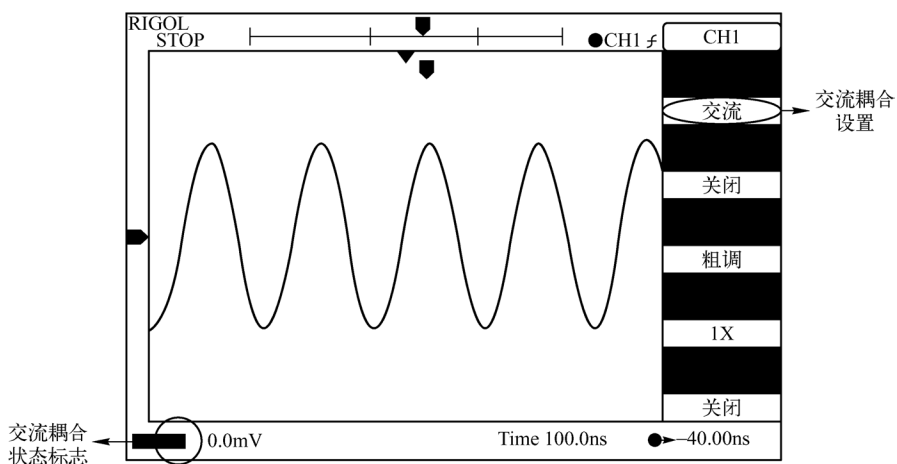


图 8-11 波形显示图(交流耦合)

b. 按 CH1→耦合→直流,设置为直流耦合方式,波形显示如图 8-12 所示;

c. 按 CH1→耦合→接地,设置为接地方式,会在屏幕中心显示一条水平线。

② 设置通道带宽限制。当被测信号是一个含有高频振荡的脉冲信号,操作步骤如下:

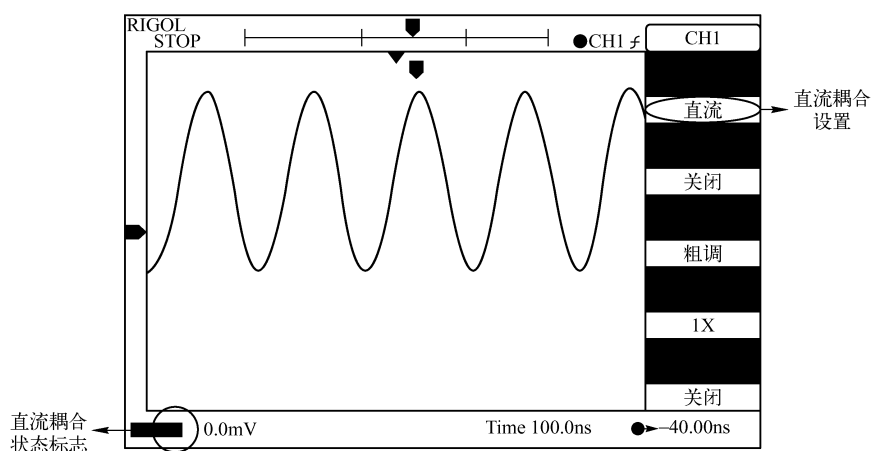


图 8-12 波形显示图 (直流耦合)

a. 按 CH1→带宽限制→关闭, 设置带宽限制为关闭状态, 被测信号中含有的高频分量可以通过, 波形显示如图 8-13 所示;

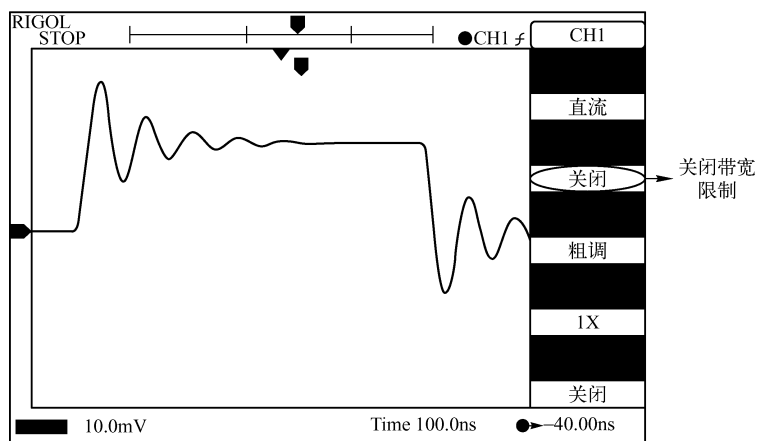


图 8-13 脉冲信号波形显示 (带宽限制关闭状态)

b. 按 CH1→带宽限制→打开, 设置带宽限制为打开状态。被测信号中含有的大于 20MHz 的高频分量被阻隔, 波形显示如图 8-14 所示。

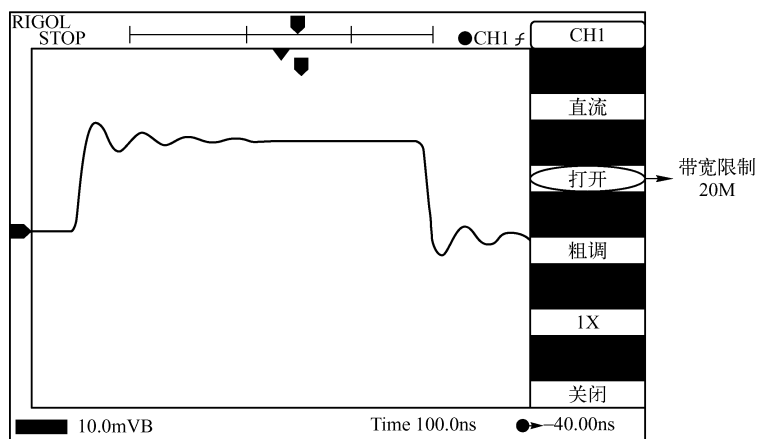


图 8-14 脉冲信号波形显示 (带宽限制打开状态)



③ 挡位调节设置。垂直挡位调节分粗调和微调两种。

a. 按 CH1→挡位调节→粗调, 设置垂直挡位为粗调, 即按 1-2-5 进制在 2mV/div ~ 5V/div 范围内设定垂直灵敏度;

b. 按 CH1→挡位调节→细调, 设置垂直挡位为细调, 可以观测信号细节;

c. 也可以按下垂直 SCALE 快速切换粗调和细调。

④ 调节探头比例。为了配合探头的衰减系数需要在通道操作菜单相应调整探头衰减比例系数。若探头的衰减系数为 100:1, 在示波器输入通道的比例也应设置成 100×, 以避免显示的挡位和测量的数据发生错误。

当使用 1000:1 探头时的设置及垂直挡位的显示, 操作步骤如下。

按 CH1→探头→1000×, 设置探头的衰减系数为 1000:1, 被测信号垂直挡位显示如图 8-15 所示。

⑤ 波形反相的设置。波形反相显示的信号相对于地电位翻转 180 度。操作步骤:

按 CH1→反向→关闭, 被测信号波形不反相;

按 CH1→反向→打开, 被测信号波形反相。

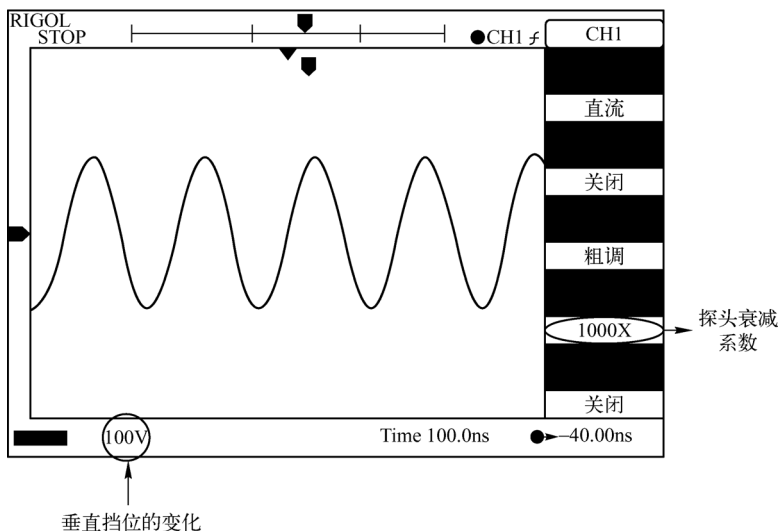


图 8-15 被测信号的垂直挡位显示

3) DS3062B 型数字存储示波器的测量应用

1. 测量一般简单周期信号

要求: 观测电路中一个未知信号, 迅速显示被测信号的波形及频率和峰—峰值。

(1) 欲迅速显示被测信号, 按如下步骤操作:

① 将探头菜单衰减系数设定为 10×, 并将探头上的开关设定为 10×;

② 将 CH1 的探头连接到电路被测点;

③ 按下 AUTO (自动设置) 按钮。

示波器将自动设置使波形显示达到最佳, 可以进一步调节垂直、水平挡位, 直至波形的显示符合要求。

(2) 对被测信号进行自动测量。示波器可对大多数显示信号进行自动测量。

① 测量峰—峰值。按如下步骤操作可以出现如图 8-16 所示菜单。

- a. 按下 MEASURE 按钮以显示自动测量菜单；
- b. 按下 1 号菜单操作键以选择信源 CH1；
- c. 按下 2 号菜单操作键选择测量类型分页：电压 1-3；
- d. 按下 3 号菜单操作键选择测量类型：峰—峰值。

此时，可以在屏幕左下角发现峰—峰值的显示。

② 测量频率。按如下步骤操作可以出现如图 8-17 所示菜单。

- a. 按下 2 号菜单操作键选择测量类型分页：时间 1-3；
- b. 按下 3 号菜单操作键选择测量类型：频率。

此时，您可以在屏幕下方发现频率的显示。测量结果在屏幕上的显示会随被测信号的变化而改变。

2. 观测电路产生的延迟

要求：观测正弦波信号通过被测电路产生的延迟及畸变。

设置探头和示波器通道的探头衰减系数为 $10\times$ ，将示波器 CH1 通道与被测电路输入端相接，CH2 通道则与被测电路输出端相接。

(1) 显示 CH1 通道和 CH2 通道的信号。

- ① 按下 AUTO（自动设置）按钮。
- ② 继续调整水平、垂直挡位直至波形显示满足测试要求。
- ③ 按 CH1 按键选择通道 1，旋转垂直（VERTICAL）区域的垂直 POSITION 旋钮调整通道 1 波形的垂直位置。
- ④ 按 CH2 按键选择通道 2，如前操作，调整通道 2 波形的垂直位置。使通道 1-2 的波形既不重叠在一起，又利于观察比较。

(2) 测量正弦信号通过电路后产生的延时，并观察被测波形的变化。

① 自动测量通道延时。按如下步骤操作可以出现如图 8-18 所示菜单。



图 8-16 电压菜单



图 8-17 频率菜单



图 8-18 延迟菜单

- a. 按下 MEASURE 按钮以显示自动测量菜单；
- b. 按下 1 号菜单操作键以选择信源 CH1；



c. 按下 2 号菜单操作键选择测量类型分页：时间 3-3；

d. 按下 3 号菜单操作键选择测量类型：延迟 1→2s。

此时，可以在屏幕左下角发现通道 1、2 在上升沿的延时数值显示。

② 观察被测波形的变化。如图 8-19 所示，屏幕左下角显示 $Dly_A = 40.0\mu s$ ，说明通道 1、2 在第一个上升沿的延时时间为 $40.0\mu s$ 。

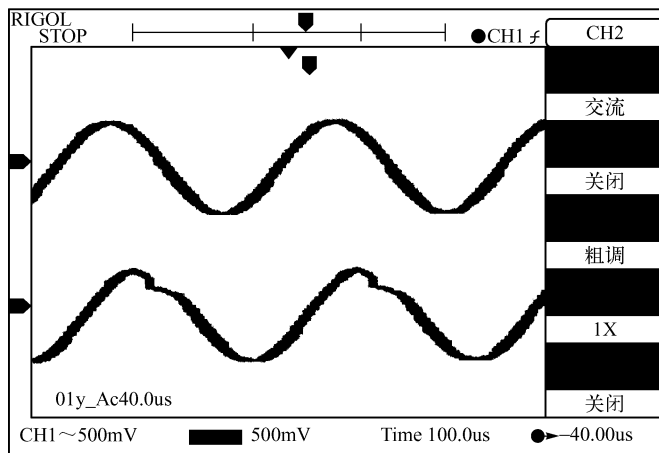


图 8-19 被测波形的变化

3. 应用光标进行测量

示波器可以自动测量 15 种波形参数。所有自动测量参数都可以通过光标进行测量。使用光标可迅速地对波形进行时间和电压测量。下面进行两个光标测量训练。

(1) 测量脉冲上升沿振铃的频率。操作步骤如下：

- ① 按下 CURSOR 按钮以显示光标测量菜单；
- ② 按下 1 号菜单操作键设置光标模式为手动；
- ③ 按下 2 号菜单操作键设置光标类型为时间；
- ④ 旋转垂直控制区域垂直 POSITION 旋钮将光标 A 置于振铃的第一个峰值处；
- ⑤ 旋转水平控制区域水平 POSITION 旋钮将光标 B 置于振铃的第二个峰值处；

如图 8-20 所示，光标菜单中显示以下测量值：光标 A 处的时间为 $300.0\mu s$ ；光标 B 处的时间为 $202.0\mu s$ ；增量时间（振铃的周期） ΔX 为 $98.0\mu s$ ，振铃的频率 $1/\Delta X$ 为 $10.2kHz$ 。

(2) 测量脉冲上升沿振铃的幅值。操作步骤如下：

- ① 按下 CURSOR 按钮以显示光标测量菜单；
- ② 按下 1 号菜单操作键设置光标模式为手动；
- ③ 按下 2 号菜单操作键设置光标类型为电压；
- ④ 旋转垂直控制区域垂直 POSITION 旋钮将光标 1 置于振铃的波峰处；
- ⑤ 旋转水平控制区域水平 POSITION 旋钮将光标 2 置于振铃的波谷处。

如图 8-21 所示光标菜单中显示以下测量值：光标 A 处的电压为 $240.0mV$ ；光标 B 处的电压为 $18.0mV$ ；增量电压（振铃的峰-峰电压） ΔY 为 $222.0mV$ 。

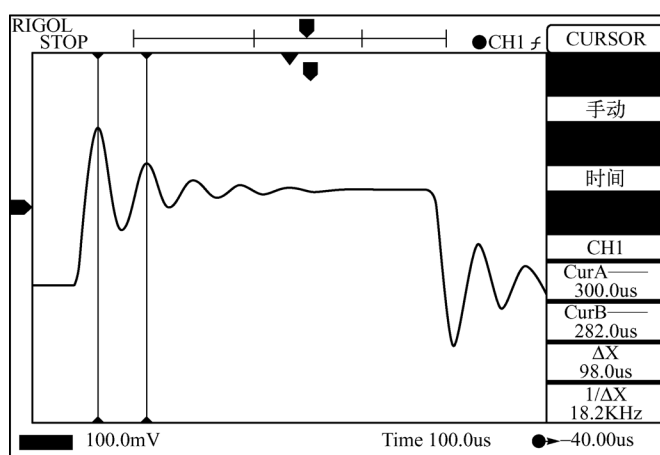


图 8-20 用光标测量时间

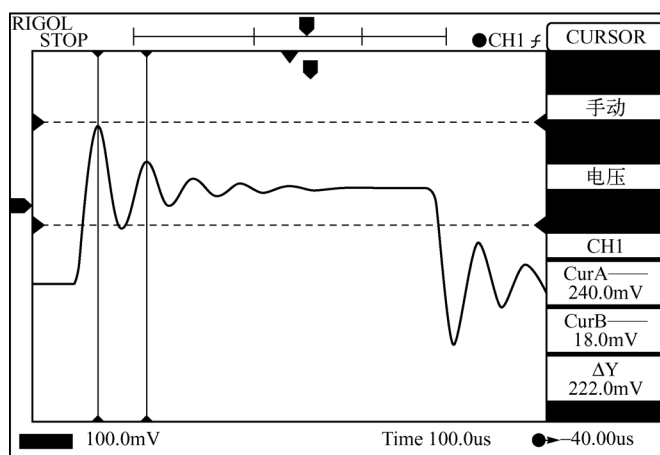


图 8-21 用光标测量电压

实训 3.3 温度测控系统性能测试实训

1. 实训目的

- (1) 了解集成温度传感器的测温原理；
- (2) 熟悉数显温度调节仪的使用方法；
- (3) 掌握温度测控系统性能测试技能。

2. 实训设备

集成温度传感器、数显温度调节仪、电热箱、标准水银温度计。

3. 实训内容

采用电流输出型集成温度传感器 AD590 进行温度测量。集成温度传感器是将热敏晶体



管与相应的辅助电路集成在同一芯片上，它能直接给出正比于绝对温度的理想线性输出，一般用于 $-50 \sim +150^{\circ}\text{C}$ 之间的温度测量，热敏晶体管是利用管子的集电极电流恒定时，晶体管的基极-发射极电压与温度成线性关系。集成温度传感器有电压输出型和电流输出型两种，电流输出型集成温度传感器，在一定温度下，相当于一个恒流源。因此它不易受接触电阻、引线电阻、电压噪声的干扰，且具有很好的线性特性。

采用 XMT-9000 型数显温度调节仪对电热箱的温度进行指示与控制，该仪表外形如图 8-22 所示。

XMT-9000 型数显温度调节仪面板标示如图 8-23 所示，各按键功能及显示内容说明如下：

- ① 温度设定键 按下进行各项温度设定；
- ② 数字移位键 使输入的数字向左移位；
- ③ 数字加按键 进行末位数字加操作；
- ④ 数字减按键 进行末位数字减操作；



图 8-22 数显温度调节仪外形图

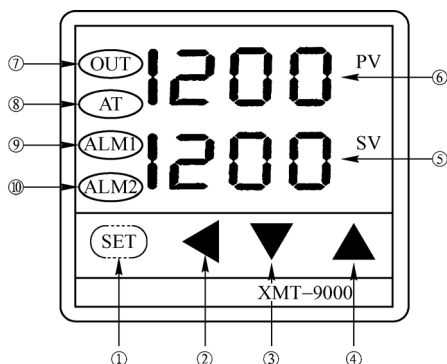


图 8-23 数显温度调节仪面板标示图

- ⑤ 设定温度显示 显示设定温度值；
- ⑥ 测量温度显示 显示测量温度值；
- ⑦ 输出状态指示灯 指示输出状态，灯亮表示输出继电器接通；
- ⑧ 自动运行指示灯 指示运行状态，灯亮表示处于自动运行状态；
- ⑨ 报警指示灯 1 运行时指示上限报警状态，灯亮表示温度高于上限报警值；
- ⑩ 报警指示灯 2 运行时指示下限报警状态，灯亮表示温度低于下限报警值。

温度测控系统性能测试实训内容如下。

(1) 将集成温度传感器 AD590 和标准水银温度计一同插入电热箱的测温孔中，将集成温度传感器（红色引出线为正端）、电热箱的 220V 电源与数显温度调节仪按图 8-24 连接。在进行测试前，先通过仪表面板按键将控制温度设定在 100°C 。

(2) 合上系统电源开关，使温度从 30°C （或室温）

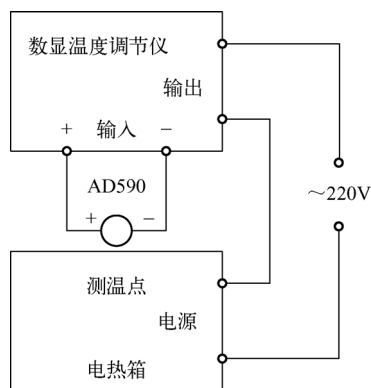


图 8-24 温度测控系统接线示意图

开始升温,每隔 10°C 读取一个点。在标准温度 T_n (T_n 为水银温度计读数) 在 $30 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围时,将数显温度调节仪的相应读数记入表 8-3 中,按下式计算在此温度范围内集成温度传感器的非线性误差 δ 。

$$\delta = (T_n - T_{\max})100\%$$

表 8-3 不同温度下数显温度调节仪的读数

标准温度 $T_n (^{\circ}\text{C})$	30	40	50	60	70	80	90	100
指示温度 $T (^{\circ}\text{C})$								

(3) 当数显温度调节仪的指示温度上升到 100°C 且温度控制稳定后,每隔 1min 读取一个温度值,持续 10min 。将数显温度调节仪的相应读数记入表 8-4 中,按下式计算在此温度上数显温度调节仪的控制误差 Δ 。

$$\Delta = (T_{\max} - T_{\min})100\%$$

表 8-4 不同时间下数显温度调节仪的读数

稳定时间 $t (\text{min})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
指示温度 $T (^{\circ}\text{C})$										

本章小结

1. 电子测量仪器与微计算机的结合形成了微计算机化仪器,又称智能仪器。智能仪器是以微处理机为基础、具有键盘操作、可实现自动测量的微计算机化仪器,如智能 DVM、智能 RLC 测量仪、智能电子计数器、智能逻辑分析仪,数字存储示波器等。

2. 智能仪器由硬件和软件组成,硬件部分包括微机系统、输入通道、输出通道、人机对话通道及通信接口,软件部分包括监控程序和接口管理程序两部分,监控程序是面向仪器键盘和显示器的管理程序,接口管理程序是面向通信接口的管理程序。

3. 自动测试系统是采用计算机控制,能自动完成输入激励、测量数据并显示或输出测试结果的系统。自动测试系统 (ATS) 一般由五部分组成。(1) 系统控制器,(2) 程控仪器设备,(3) 总线与接口,(4) 测试软件,(5) 被测对象。

4. 自动测试系统的发展经历了三个阶段。第一阶段为单机及专用系统阶段;第二阶段为标准接口总线阶段;第三阶段为计算机仪器阶段。自动测试系统的总线是一种系统中各功能部件之间进行信息传输的公共通道,总线技术是自动测试系统的核心。

项目 8 思考题

1. 什么是智能仪器? 智能仪器的特点是什么?
2. 智能仪器由哪几部分组成? 各部分作用是什么?
3. 自动测试系统的发展经历了哪几个阶段?



4. 什么是自动测试系统？自动测试系统的特点是什么？
5. 自动测试系统由哪几部分组成？各部分作用是什么？
6. 常用系统总线有那些？如何合理择测试系统总线？
7. GPIB 总线的特点是什么？
8. VXI 总线的特点是什么？
9. PXI 总线的特点是什么？
10. 如何选择自动测试总线？

项目 9 虚拟仪器技术及应用



本项目任务目标

1. 学习虚拟仪器的基本知识：应了解虚拟仪器的基本概念、虚拟仪器的结构组成特点和虚拟仪器的发展趋势；
2. 学习虚拟仪器的应用软件：应了解 LabVIEW 的结构、编程环境，基本 VI 的概念，掌握功能模板的使用和数据结构类型；
3. 学习虚拟仪器的程序结构：应了解 LabVIEW 的程序结构，掌握 For 循环、While 循环、选择结构以及图形显示控件的使用；
4. 进行虚拟仪器的设计实训：通过训练掌握虚拟正弦信号发生器、虚拟频谱分析仪的基本设计过程和设计方法。

任务 1 知识引领——虚拟仪器的基本知识

目前，在计算机和网络技术高速发展的时代，利用计算机和网络技术对传统的产业进行改造，已是大势所趋，而虚拟仪器系统正是计算机和网络技术与传统仪器技术进行融合的产物，因此，在 21 世纪虚拟仪器技术将会引发传统仪器产业一场新的革命。

知识 1.1 虚拟仪器的一般概念

所谓虚拟仪器（Virtual Instrument，VI），是在计算机硬件平台上，配以 I/O 接口设备，由用户自行设计虚拟控制面板和测试功能的一种计算机仪器系统。

虚拟仪器是利用计算机显示器的显示功能模拟传统仪器的控制面板，以多种形式表达输出测试结果。由 I/O 接口设备完成信号的采集、变换与调理，利用计算机强大的软件功能实现信号数据的运算、分析、处理，从而完成各种测试功能。

20 多年前，美国国家仪器公司 NI（National Instruments）提出了虚拟仪器（VI）概念，由此引发了传统仪器领域的一场重大变革，从而开创了“软件即是仪器”的先河。虚拟仪器通过软件将计算机硬件资源与仪器硬件有机的融合为一体，从而把计算机强大的计算处理能力和仪器硬件的测量、控制能力结合在一起，大大缩小了仪器硬件的成本和体积，并通过软件实现对数据的显示、存储以及分析、处理。



从发展历史上看,电子测量仪器经历了由模拟仪器、智能仪器到虚拟仪器的发展过程,虚拟仪器具有传统独立仪器无法比拟的优势,但它并不否定传统仪器的作用,它们相互交叉又相互补充,相得益彰。在高速度、高带宽和专业测试领域,独立仪器具有无可替代的优势,在中低档测试领域,虚拟仪器可取代一部分独立仪器的工作,而完成复杂环境下的自动化测试则是虚拟仪器的优势,是传统的独立仪器难以胜任的。

知识 1.2 虚拟仪器的结构组成

虚拟仪器由硬件和软件组成

1. 虚拟仪器的硬件

构成虚拟仪器的硬件平台包括两部分:

(1) 计算机 一般为一台 PC 或者工作站,它是硬件平台的核心。

(2) I/O 接口设备 主要完成被测输入信号的采集、放大、模/数转换。可根据实际情况采用不同的 I/O 接口硬件设备,如数据采集卡/板(DAQ)、GPIB 总线仪器、VXI 总线仪器模块、串口仪器等。虚拟仪器的构成方式主要有五种类型,如图 9-1 所示。

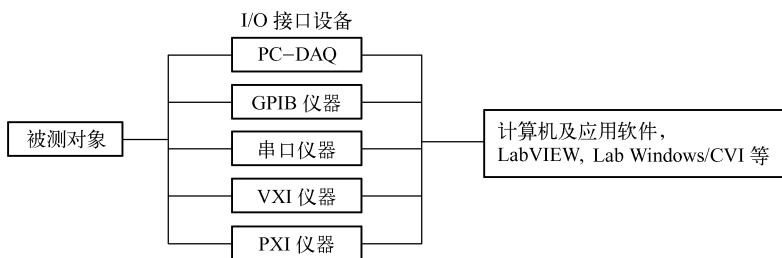


图 9-1 虚拟仪器的组成

① PC-DAQ 系统:是以数据采集板、信号调理电路和计算机为仪器硬件平台组成的插卡式虚拟仪器系统。

② GPIB 系统:以 GPIB 标准总线仪器与计算机为仪器硬件平台组成的虚拟仪器系统。

③ VXI 系统:以 VXI 标准总线仪器模块与计算机为仪器硬件平台组成的虚拟仪器测试系统。

④ PXI 系统:以 PXI 标准总线仪器模块与计算机为仪器硬件平台组成的虚拟仪器测试系统。

⑤ 串口系统:以 Serial 标准总线仪器与计算机为仪器硬件平台组成的虚拟仪器系统。

无论上述哪种 VI 系统,都通过应用软件将仪器硬件与通用计算机结合。其中 PC-DAQ 系统是构成 VI 的最基本的方式,也是最廉价的方式。

2. 虚拟仪器的软件

虚拟仪器的软件由两大部分构成。

(1) 应用程序 它包含两个方面的程序：

① 实现虚拟面板功能的前面板软件程序。

② 定义测试功能的流程图软件程序。

(2) I/O 接口仪器驱动程序 它用来完成特定外部硬件仪器设备的扩展、驱动与通信。

开发虚拟仪器，必须有合适的软件工具。目前已有多种虚拟仪器的软件开发工具。

① 文本式编程语言：如 C、Visual C++、Visual Basic、Lab Windows/CVI 等。

② 图形化编程语言：如 LabVIEW、HP VEE 等。

这些软件开发工具为用户设计虚拟仪器的应用软件提供了最大限度的方便条件与良好的开发环境。本书要介绍的是 LabVIEW 图形化编程语言。

知识 1.3 虚拟仪器的性能特点

虚拟仪器与传统仪器有着很大差别，传统仪器主要由硬件组成，需要操作者操作面板上的开关旋钮来完成测量工作，其测试功能是由具体的电子电路来实现的。而在虚拟仪器中，其测试功能主要由软件完成，其操作面板变成了与实物控件对应的图标。所以，虚拟仪器具有以下特点：

1. 虚拟仪器的面板是虚拟图标

虚拟仪器面板上的各种“控件”与传统仪器面板上的各种“器件”所完成的功能是相同的，它的外形是与实物相像的“图标”。对虚拟仪器的操作只需用鼠标单击相应的图标即可，设计虚拟面板的过程就是在前面板窗口中选取、摆放所需的图形控件的过程。所以，虚拟仪器具有良好的人机交互界面，使用 LabVIEW 图形化编程语言，可在短时间内轻松完成一个美观而又实用的“虚拟仪器前面板”的设计，使整个设计过程变得轻松而有趣。

2. 虚拟仪器的测量功能由软件编程实现

在以 PC 计算机为核心组成的硬件平台支持下，通过软件编程设计来实现仪器的测试功能，而且可以通过不同测试功能软件模块的组合来实现多种测试功能，因此，虚拟仪器具有很强的扩展功能和数据处理能力。

3. 虚拟仪器的开发周期短且更新速度快

传统仪器的技术更新周期大约是 5 至 10 年，而虚拟仪器的更新周期是 1 至 2 年。

4. 虚拟仪器的软件和硬件都具有开放性

虚拟仪器的软件、硬件都具有开放性、模块化、可重复使用、应用方便的特点。

5. 虚拟仪器易实现测量自动化和网络化

通过使用通用标准接口总线和网卡，极易实现测量自动化、智能化和网络化。



任务2 知识引领——虚拟仪器的软件

知识 2.1 LabVIEW 软件简介

1. LabVIEW 软件的特点

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, 实验室虚拟仪器工程平台) 是美国国家仪器公司 (National Instrument Company, NI 公司) 开发的一种基于 G 语言 (Graphics Language, 图形化编程语言) 的虚拟仪器软件开发工具。

LabVIEW 是一种用图标代码来代替编程语言来创建应用程序的开发工具。它以数据流编程的方法描述程序的执行。LabVIEW 用图形语言 (图标和连线) 代替文本的形式来编写程序, 它所具有的扩展函数库包括数据采集、GPIB 和串口仪器控制、数据显示、分析与存储等内容。为了便于程序的开发调试, LabVIEW 还带有传统的开发调试工具, 可设置断点、单步执行, 也可以激活程序的执行过程, 以动画的形式查看数据流的运行情况。

LabVIEW 为虚拟仪器设计者提供了一个便捷、轻松的设计环境, 利用它, 设计者可以像搭积木一样, 轻松组建一个测量系统并构造自己的仪器面板, 而无需进行任何烦琐的计算机代码的编写。LabVIEW 还带有专门的函数库和数学分析程序包, 可以满足复杂的工程计算和分析要求。

在 LabVIEW 环境下开发的程序称为虚拟仪器 VI (Virtual Instruments)。开发成功的虚拟仪器可脱离 LabVIEW 环境, 用户最终使用的是和实际硬件仪器相似的操作面板。

综上所述, LabVIEW 具有如下特点:

- ① 图形化的编程方式, 设计者无需写任何文本格式的代码, 是真正的工程师的语言。
- ② 提供了丰富的数据采集、分析及存储的库函数。
- ③ 不仅提供了传统的程序调试手段, 如设置断点、单步运行, 同时还提供有独到的高亮执行工具, 使程序动画式运行, 利于设计者观察程序运行的细节, 使程序的调试和开发更为便捷。
- ④ 提供了大量与外部代码或软件进行连接的机制, 诸如 DLLs (动态连接库)、DDE (共享库)、ActiveX 等。
- ⑤ 具有强大的 Internet 功能, 支持常用网络协议, 方便网络、远程测控仪器的开发。

2. LabVIEW 的编程环境

这里以 LabVIEW 7 Express 为例, 介绍 LabVIEW 系统安装、基本组成和编程环境。

(1) LabVIEW 系统安装

将 LabVIEW 7 Express 光盘插入 CD 驱动器后, 只需运行安装光盘中的 Setup 程序, 按照屏幕提示, 选择必要的安装选项即可完成。为了控制 DAQ、VXI、GPIB 等硬件设备, 在 LabVIEW 系统安装完成后, 还必须安装 NI 公司提供的仪器驱动程序。

(2) LabVIEW 启动

双击 LabVIEW 快捷方式图标即可启动 LabVIEW。启动后的界面如图 9-2 所示。界面右侧有 4 个按钮，每个按钮都包含按钮主体和下拉菜单。单击按钮主体则弹出相应的对话框，单击右侧下拉按钮则弹出下拉菜单。

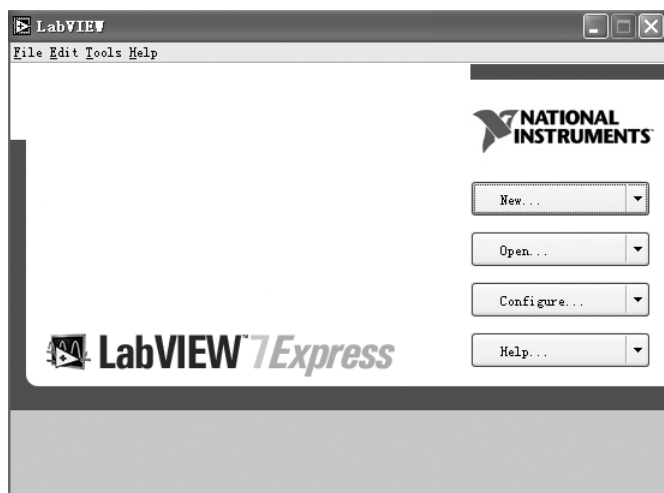


图 9-2 LabVIEW 7Express 启动界面

当用户单击 New VI 按钮右侧下拉按钮，并在下拉菜单中选择 Blank VI，LabVIEW 会生成一个空 VI，空 VI 包括两个窗口，一个是前面板窗口，用于设计和编辑前面板对象，另一个是框图程序窗口，用于设计和编辑框图程序。

(3) 窗口工具条

在前面板和框图程序窗口，设有编辑对象用的工具条，各图标的功能如图 9-3 所示。

(4) 窗口主菜单

主菜单栏共有七个子菜单如图 9-4 所示。

① File（文件）子菜单。在进入 LabVIEW 窗口后，如果想进行新建（New）、打开（Open）、保存（Save）、打印（Print）、关闭（Close）等操作，可单击 File 中的相应选项。

② Edit（编辑）子菜单。将文本式编程语言中常用的 Cut（剪切）、Copy（复制）、Paste（粘贴）功能用于 LabVIEW 中的图标及控件的操作。

③ Operate（操作）子菜单，主要选项有 Run（运行）、Stop（停止）、Suspend When Called（当 VI 被调用时暂停执行）、Print at Completion（运行完后打印前面板）等，用于调试或运行 LabVIEW 程序。

④ Tools（工具）子菜单。该菜单主要用于仪器及数据采集板之间通信、比较 VI、编译程序、允许访问 Web 服务器及其他选项。

⑤ Browse（浏览）子菜单。该菜单主要用于定位 VI 的各个层次。

⑥ Window（窗口）子菜单。该菜单主要用于弹出 Diagram（流程图）编辑窗口、Front Panel（前面板）设计窗口、Tools Palette（工具模板）、Functions Palette（功能模板）和 Controls Palette（控制模板）等操作。

⑦ Help（帮助）子菜单。该菜单主要用于获取帮助信息。

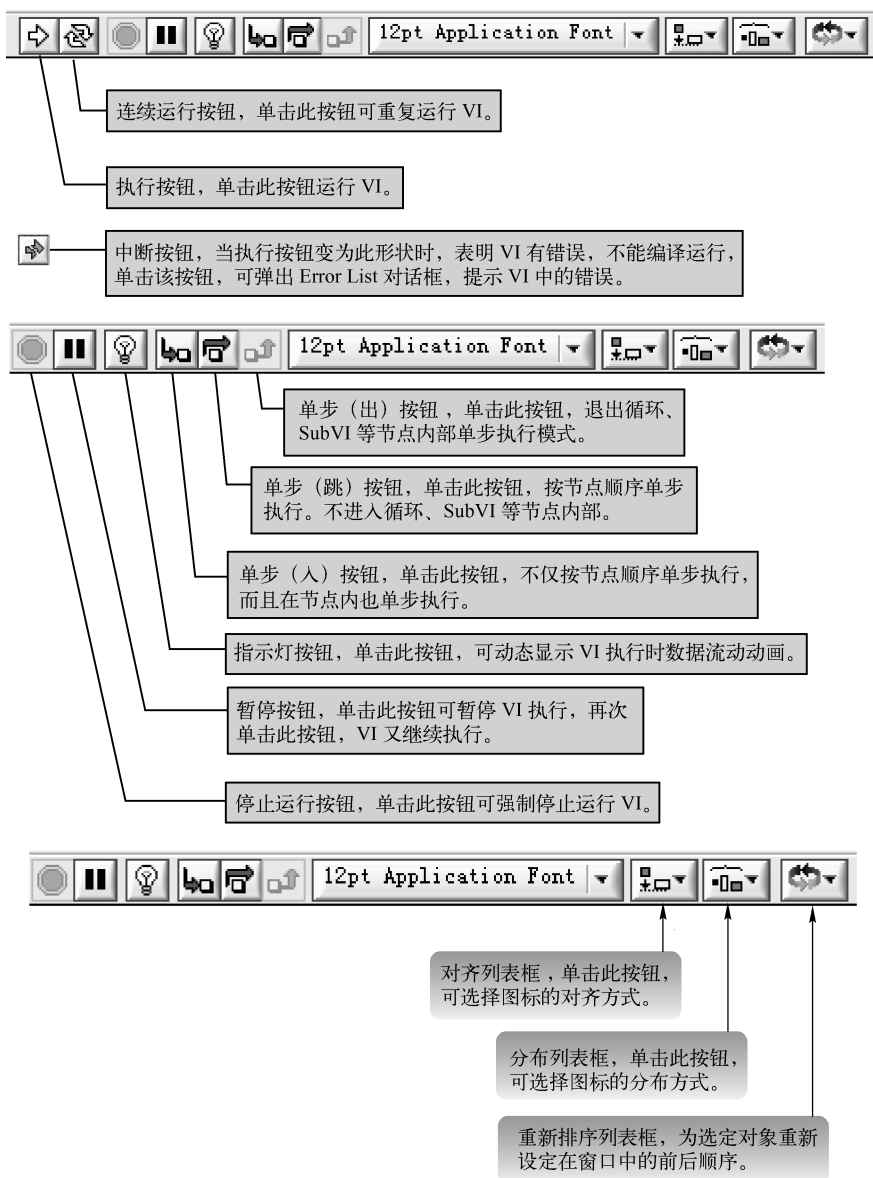


图 9-3 各图标的功能

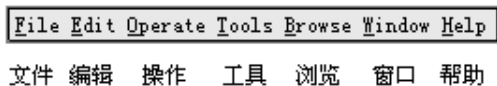


图 9-4 窗口主菜单

知识 2.2 基本 VI 的组成

基本 VI 由程序前面板(Front Panel)、框图程序(Block Diagram)、图标/连接端口(Icon/Connector)三部分组成。

图 9-5、图 9-6 是一个正弦信号发生器 VI 的前面板和框图程序，前面板有一个波形显示控件，在框图程序中，有与之对应的图标端口和模拟信号产生 VI。

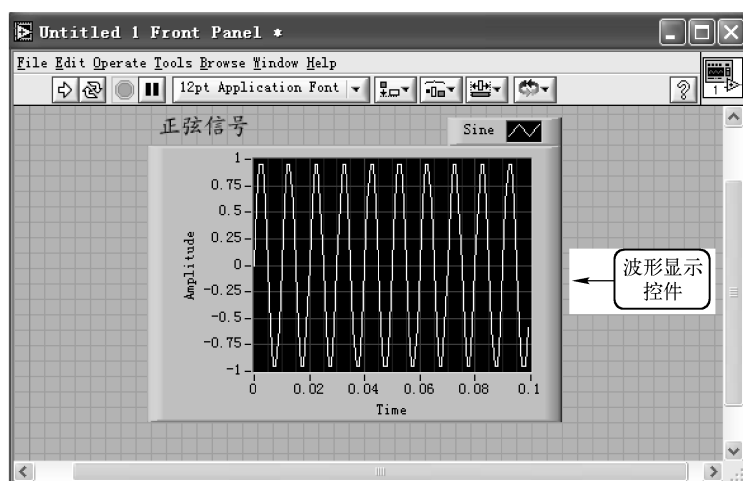


图 9-5 正弦信号发生器前面板

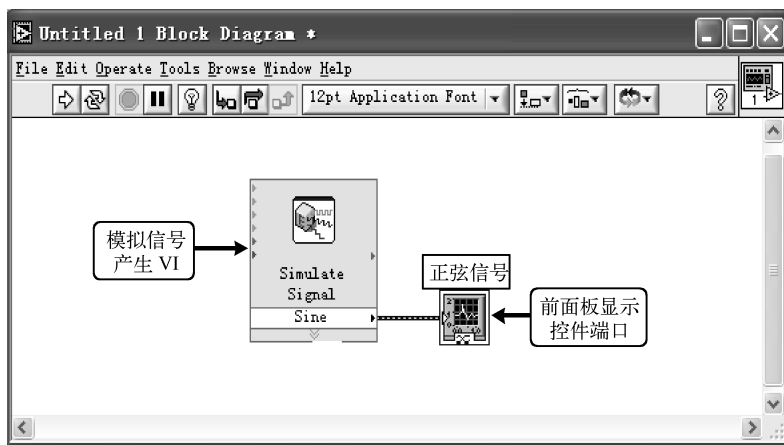


图 9-6 正弦信号发生器框图程序

1. 框图程序

框图程序由节点 (Node)、端口 (Terminal) 和数据连线 (Wire) 组成。

(1) 节点是程序的执行元素，相当于文本语言中的语句、函数或子程序。LabVIEW 有 4 种节点类型：功能函数 (Functions)、结构控制 (Structures)、代码端口 (CIN) 和子 VI 节点。

① 功能函数是执行各种数学运算、文件输入输出等基本操作的节点，是 LabVIEW 编译好的机器代码，以图标形式出现，供用户使用，节点代码不能修改。

② 结构控制节点被用来实现结构化程序控制命令，如循环控制、条件分支控制和顺序控制等。



③ 代码端口节点是框图程序与用户提供的 C 语言文本程序的接口。

④ 子 VI 节点相当于常规编程语言的子程序，是为编程方便而专门设计的，将其封装成函数节点的形式供用户调用。与功能函数节点的区别是用户可以修改其节点代码。

(2) 端口是数据在框图程序和前面板之间、节点和节点之间传输而经过的接口。端口有控制和指示端口、节点端口两种类型：

① 控制和指示端口 用于前面板对象和框图程序交换数据。

② 节点端口 每个节点都有一个或数个数据端口，用以输入和输出数据。

(3) 数据连线代表程序执行过程中的数据流，表示框图内数据流动方向及其类型。在 LabVIEW 中用不同的线型和颜色区分不同的数据类型，表 9-1 列出不同数据类型的线型和颜色。

表 9-1 不同数据类型的线型和颜色

数据类型	标 量	一 维 数 组	二 维 数 组	颜 色
数字量				橙色（浮点数）
				蓝色（整数）
布尔量				绿色
字符串				紫色
簇				紫色

知识 2.3 LabVIEW 的模板

1. 工具模板 (Tools Palette)

工具模板提供了用于创建、编辑和修改前面板和流程图上对象的各种工具，如图 9-7 所示。如果想选用某操作工具，只需用鼠标单击该工具图标即可。

工具模板的调用方法：

执行“Windows > > Show Tools Palette”操作。

各图标对应的功能如表 9-2 所示。

2. 控制模板 (Controls Palette)

控制模板是 LabVIEW 为用户设计虚拟面板而提供的，因此它只会在前面板编辑窗口中出现。

控制模板的调用方法：

(1) 执行“Windows > > Show Controls Palette”操作。

(2) 使用工具模板上的 Object Shortcut Menu 工具，左键单击前面板窗口中的空白位置。

(3) 用鼠标右键单击窗口的任一空白区域。

控制模板如图 9-8 所示。各图标对应的功能如表 9-3 所示。



图 9-7 工具模板

表 9-2 LabVIEW 工具模板的图标及功能

序 号	图 标	名 称	功 能 说 明
1		操作工具 (Operate Value)	用于管理前面板对象。将操作工具移动到某处，鼠标单击后，就可在操作工具所在位置处输入数字或文本
2		选择工具 (Position/Size/Select)	用于选择、移动对象或改变对象的大小
3		文字工具 (Edit Text)	用于输入标签文本或者创建自由标签
4		连线工具 (Connect Wire)	用于在流程图中连接对象。使用方法是：单击需连线的两端。这两端必须是前节点的输出端和后节点的输入端
5		快捷菜单弹出工具 (Object Shortcut Menu)	弹出菜单工具，用于弹出对象的属性菜单，作用与鼠标右键相同
6		滚动工具 (Scroll Window)	用于在窗口中移动对象，可代替滚动条
7		断点工具 (Set/Clear Breakpoint)	用于给框图对象设置或清除断点
8		探针工具 (Probe Data)	可以在流程图的数据流线上设置探针。通过探针窗口来观察该数据流线上的数据变化状况
9		提取颜色工具 (Get Color)	用来获取窗口中已染色对象的颜色
10		设置颜色工具 (Set Color)	用来给窗口中的对象设置颜色

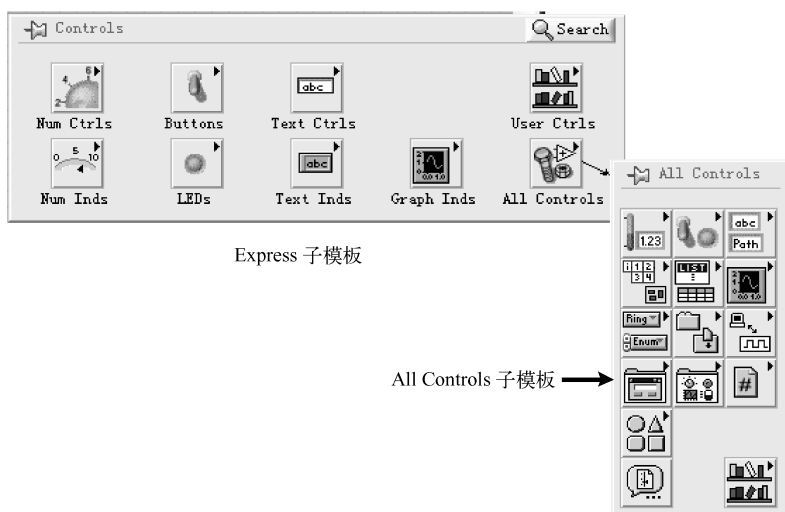


图 9-8 控制模板



表 9-3 LabVIEW 控制模板的图标及功能

序 号	图 标	子模板名称	功 能 说 明
1		Numeric (数量值)	数值的控制和显示, 包括数字式、指针式显示表盘及各种输入框
2		Boolean (布尔量)	逻辑数值的控制和显示, 包括各种类型的布尔开关、按钮、指示灯等
3		String & Path (字符串和路径)	字符串和路径的控制和显示
4		Array & Cluster (数组和簇)	数组和簇的控制和显示
5		List & Table (列表和表格)	列表和表格的控制和显示
6		Graph (图形显示)	显示数据结果的趋势图和曲线图
7		Ring & Enum (环与枚举)	环与枚举的控制和显示
8		Containers (容器)	用于组合控件, 或在当前 VI 的前面板上显示另一个 VI 的前面板
9		I/O (输入/输出)	用于将所配置的 DAQ 通道名称、VISA 资源名称和 IVI 逻辑名称传递至 I/OVI, 与仪器或 DAQ 设备进行通信
10		Dialog (对话框)	提供各种标准对话框
11		Classic Controls (经典控件)	LabVIEW 7 Express 版本以前的控件可通过此模板查找
12		Refnum (引用句柄)	可用于对文件、目录、设备和网络连接等进行操作
13		Decorations (装饰)	提供对前面板进行装饰用的各种图形控件
14		Select a Control (选择控件)	提供对话框, 以便装载定制的控件
15		User Controls (用户控件)	用户自定义的控制和显示

3. 功能模板 (Functions Palette)

LabVIEW 将传统仪器上的各种测试功能做成可供直接调用的库函数, 并将各个库函数做成图标的形式存放在相应功能的子模板上。功能模板, 如图 9-9 所示, 是 LabVIEW 为用户设计流程图而提供的, 因此它只会在流程图编辑窗口中出现。图标及功能如表 9-4 所示。功能模板的调用方法:

- (1) 执行“Windows > > Show Functions”操作。
- (2) 用工具模板上的 Object Popup 工具, 用左键单击流程图编辑窗口的空白位置。
- (3) 用鼠标右键单击窗口空白区域。

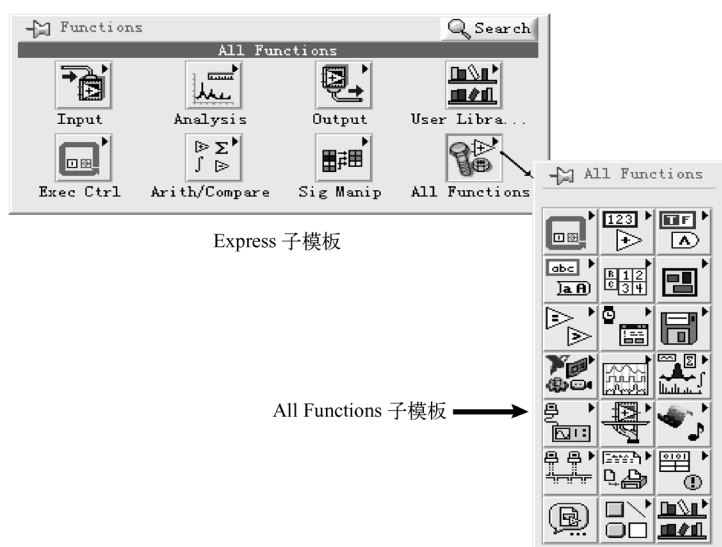


图 9-9 功能模板

表 9-4 LabVIEW 功能模板的图标及功能

序 号	图 标	子模板名称	功 能 说 明
1		Structures (结构)	提供程序控制结构命令, 例如循环控制 (For 结构、While 结构), 以及全局变量和局部变量
2		Numeric (数值运算)	提供各种常用的数值运算符和数值运算式, 数制转换以及各种数值常数
3		Boolean (布尔运算)	提供各种逻辑运算符以及布尔常数
4		String (字符串运算)	提供各种字符串操作函数、数值与字符串之间的转换函数以及字符(串)常数等
5		Array (数组)	提供数组运算函数、数组转换函数以及常数数组等
6		Cluster (簇)	提供簇的处理函数以及簇常数等
7		Comparison (比较)	提供各种比较运算函数
8		Time & Dialog (时间和对话框)	提供对话框窗口、时间和出错处理函数等
9		File I/O (文件输入/输出)	提供处理文件输入/输出的程序和函数, 主要用于创建和打开数据文件, 并进行数据读写
10		NI measurements (NI 测量)	提供各种与数据采集相关的 VI, 需要单独安装
11		Waveform (波形)	各种波形处理工具
12		Analyze (分析)	信号发生、时域及频域分析功能模块及数学工具



续表

序 号	图 标	子模板名称	功 能 说 明
13		Instrument I/O (仪器输入/输出)	提供各种 I/O 接口设备用的控制模块和仪器驱动 VI
14		Application Control (应用控制)	提供外部程序或 VI 调用和打印选单、帮助管理等辅助功能
15		Graphics & Sound (图形与声音)	提供图形与声音处理功能函数
16		Communication (通信)	提供支持 TCP、UDP、DDE、OLE、ActiveX 协议和启动外部程序的模块
17		Report Generation (文档生成)	提供生成各种报表和文档的功能函数
18		Advanced (高级)	提供库函数调用、代码接口节点、数据管理、内存管理和程序标志管理等高级功能
19		Select a VI (选择子 VI)	用于调用子 VI 或全局变量
20		Decorations (装饰)	提供文字注释、箭头、线条等工具
21		User Library (用户子 VI 库)	用来存放用户自行设计的 VI

知识 2.4 LabVIEW 的数据类型

LabVIEW 的数据类型按其功能可以分为两类,即常量和变量。变量又分为控制变量和显示变量。按其特征可分为数字量类型和非数字量类型,并用不同的图标来代表不同的数据类型。


1. 数字量数据类型

数字量数据类型可分为浮点数、整数和复数(实部和虚部都是浮点数)三种基本形式。所有数字量数据类型如表 9-5 所示。

表 9-5 数字量数据类型

数 据 类 型	端 口 图 标	存 储 位 数	数 值 范 围
单字节有符号整数		8	-128~127
单字节无符号整数		8	0~255
双字节有符号整数		16	-32768~32767
双字节无符号整数		16	0~65535









续表

数据类型	端口图标	存储位数	数值范围
四字节有符号整数		32	$-2147483648 \sim 2147483647$
四字节无符号整数		32	$0 \sim 4294967295$
单精度浮点型		32	最小正数 $1.40e-45$ ，最大正数 $3.40e+38$ ，（绝对值）最小负数 $-1.40e-45$ ，（绝对值）最大负数 $-3.40e+38$
复数单精度浮点型		64	实部和虚部分别与单精度浮点数相同
双精度浮点型		64	最小正数 $4.94e-324$ ，最大正数 $1.79e+308$ ，（绝对值）最小负数 $-4.94e-324$ ，（绝对值）最大负数 $-1.79e+308$
复数双精度浮点型		128	实部和虚部分别与双精度浮点数相同
扩展精度浮点型		128	最小正数 $6.48e-4966$ ，最大正数 $1.19e+4932$ ，（绝对值）最小负数 $-6.48e-4966$ ，（绝对值）最大负数 $-1.19e+4932$
复数扩展精度浮点型		256	实部和虚部分别与扩展精度浮点数相同

2. 非数字量数据类型

部分非数字量数据类型如表 9-6 所示。

表 9-6 非数字量数据类型

数据类型	图标	数据类型	图标
布尔量数据		簇数据类型	
字符串类型		数组数据	
路径数据		波形数据	
I/O 通道数据		数字波形数据	

任务 3 知识引领——虚拟仪器的基本程序结构

LabVIEW 采用结构化数据流图编程，能处理循环、顺序、选择、事件等程序控制的结构框架。结构子模板如图 9-10 所示，下面主要介绍常用的 For Loop、While Loop、Case 三种程序结构。

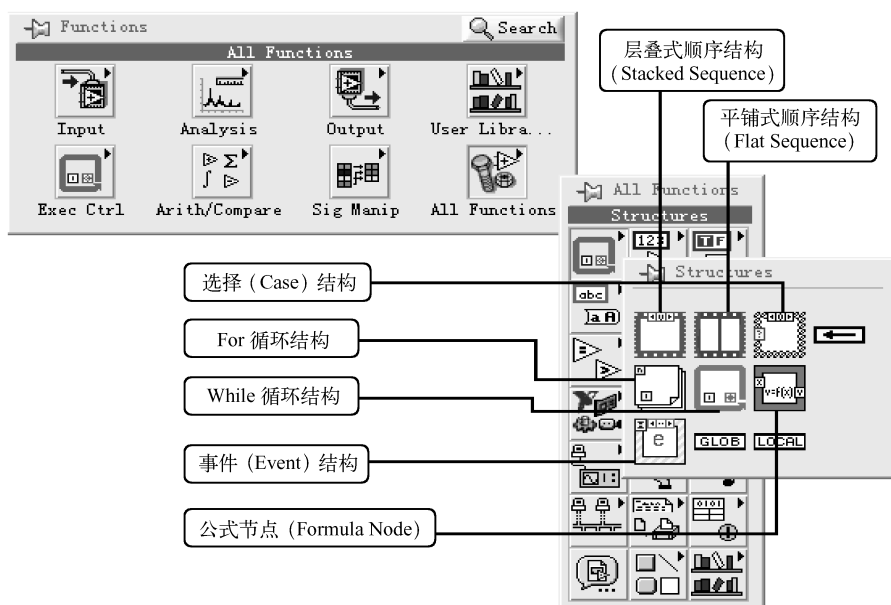


图9-10 结构子模板

知识 3.1 For 循环

1. 创建 For 循环框架

功能模板：Functions→Structures→For Loop，基本 For 循环由循环框架、重复端口、计数端口组成，如图 9-11 所示。

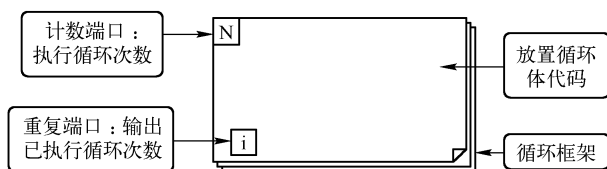


图9-11 基本 For 循环组成

2. For 循环的工作流程

在开始 For 循环之前，从计数端口读入循环次数，重复端口输出“0”值，接下来执行 For 循环框内框图代码程序，每执行一次重复端口 i 值自动加 1，循环次数达到设定值后，退出循环。

3. For 循环的数据通道与自动索引

循环框外面的数据可通过数据通道进入循环框内，同样，循环框内的数据也可通过数据通道传送到循环框外。用连线工具连接循环框内外的数据端口时，在框架上会自动形成方形

通道图标，空心图标表明具有自动索引功能，实心图标不能索引，For 循环默认为能自动索引，在循环通道弹出菜单中选择 Disable Indexing，则变为不能索引。

自动索引是指将循环框外面的数组成员逐个依次进入循环体内，或将循环框内的数据累加成一个数组输出到循环框外面。使用自动索引功能时，从循环框外面连接到输入通道的一维数组将索引成单个成员，在循环的输出边框，单个元素依次累加成一维数组。

4. For 循环的移位寄存器功能

用鼠标右键单击 For Loop 图标的边框，会弹出 For Loop 对话框，选择 Add Shift Register 选项，就添加了一个移位寄存器。它通常以成对的两个小方框出现在结构体的左右边框，右侧小方框将本次循环的执行结果暂存起来，左侧小方框取得上次循环的结果，供本次循环使用。

5. For 循环的使用

图 9-12 为计算 $N!$ 的前面板和框图程序。

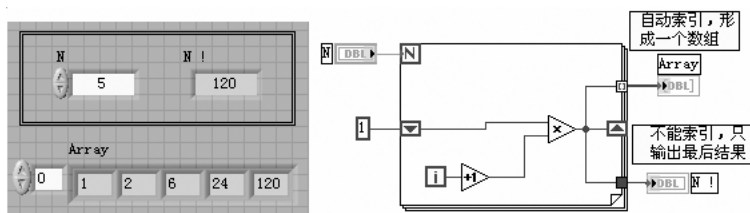


图 9-12 计算 $N!$ 的前面板和框图程序

知识 3.2 While 循环

1. 创建 While 循环框架

功能模板：Functions→Structures→While Loop，基本 While 循环由循环框架、重复端口、条件端口组成，如图 9-13 所示。



图 9-13 基本 While 循环的组成

2. While 循环的工作流程

While 循环执行循环框中的程序时，其循环次数是不固定的，用条件端口控制循环的停止与否。条件端口有两种状态，当使用状态为 Stop if True 时，若输入值为 True，则停止循



环；若输入值为 False，则继续执行下一次循环。当使用状态为 Continue if True 时，若输入值为 True，则继续执行下一次循环；若输入值为 False，则停止循环。

While 循环的自动索引、移位寄存器和重复端口的用法与 For 循环相同，只是 While 循环的边框通道默认为不能索引。

知识 3.3 选择结构

1. 创建 Case Structure 框架

功能模板：Functions→Structures→Case Structure，基本 Case Structure 由选择框架、选择端口、选择器标签，以及递增/递减按钮组成，如图 9-14 所示。

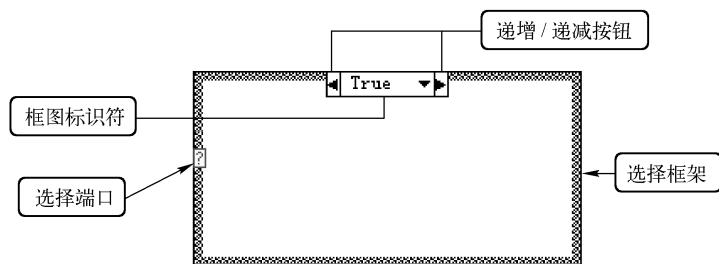


图 9-14 选择结构的组成

2. Case Structure 的工作流程

用选择结构编程时，将外部控制条件连接至选择端口上，程序运行时选择端口会判断送来的控制条件，引导选择结构执行相应框架中的内容。输入到选择端口的控制条件的数据类型有三种：布尔型、数字型和字符串型，当控制条件为布尔型时，有 True 和 False 两种选择框架。当控制条件为数字型时，选择器标签值为整数 0, 1, 2, …，选择框架的个数可根据实际需要确定。当控制条件为字符串型时，选择器标签的值为双引号括起来的字符串，选择框架的个数也可根据实际需要确定。

知识 3.4 图形显示控件

LabVIEW 的图形子模板提供了完成各种图形显示功能的控件。这里简单介绍图形子模板中前三种常用图形控件——事后记录波形图控件（Waveform Graph）、实时趋势图控件（Waveform Chart）和 XY 波形图控件（XY Graph）的功能。

1. 事后记录波形图控件（Waveform Graph）

(1) 主要功能

Waveform Graph 可以显示单个信号波形，也可以同时显示多个信号波形。它的数据输入基本形式是数组或簇，输入数据中包含了所有需要显示的格式化测量数据。该控件显示时是

以一次刷新的方式进行的,也就是说将构成数组的全部测量数据一次显示出来。图 9-15 显示了 Waveform Graph 的所有组件。

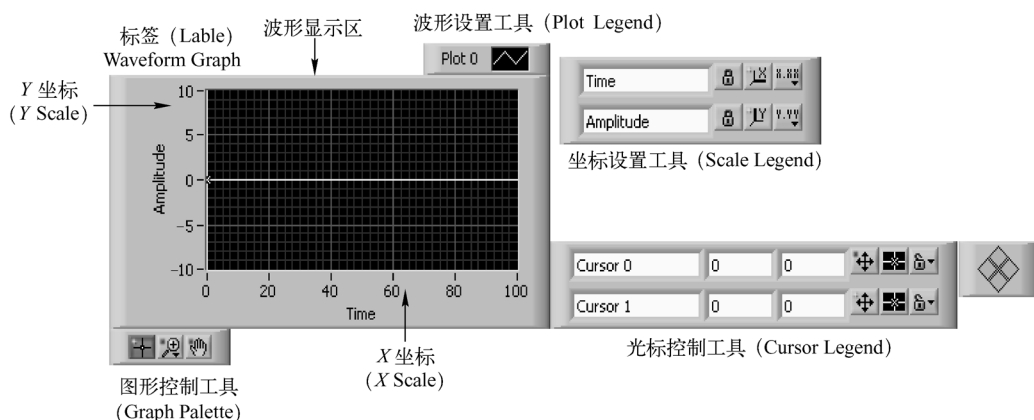


图 9-15 Waveform Graph 的组件

各组件的功能如下:

- ① 标签 (Label): 可通过文本编辑工具给控件命名。
- ② 坐标设置工具 (Scale Legend): 将横轴定义为 X 轴, 代表数组中数据的序号, 纵轴定义为 Y 轴, 表示要显示测量数据点的数值大小。在默认条件下, X 轴初值为 0, 步长为 1, 最大刻度范围根据数组长度自动调整, 而 Y 轴刻度则根据数组中最大与最小值范围自动设定。通过 Scale Legend 可设置 X 、 Y 轴名称、自动量程选择、数据格式、精度、网格线、坐标类型等参数。
- ③ 波形设置工具 (Plot Legend): 通过该控件的弹出菜单, 可以设定波形曲线的各种属性, 如波形的名称、线型和颜色等。
- ④ 图形控制工具 (Graph Palette): 该控件由光标选择工具、图形缩放工具和图形移动工具组成, 通过图形控制工具, 可以在程序运行中放大、缩小、移动所显示波形。
- ⑤ 光标控制工具 (Cursor Legend): 此控件可以移动光标、设置光标名称、颜色、形状、线型等属性, 还可以显示光标所在位置的坐标。

2. Waveform Graph 控件的使用

设计一个程序, 测量一个随机信号的电压值并进行滤波处理 (以前 5 点的平均值作为滤波方法), 要求共测量 50 点, 同时显示滤波前后信号波形。

根据要求, 只要将两组数据组成一个二维数组, 再把这个二维数组送入波形显示控件即可, 显示结果及框图程序如图 9-16 所示。

3. 实时趋势图控件 (Waveform Chart)

(1) 主要功能

实时趋势图控件 (Waveform Chart) 可以完成信号的动态显示。即每接收到一个数据, 就立即显示一个数据, 新数据不断淘汰掉旧数据, 从而得到连续的波形。因此, 这种显示方

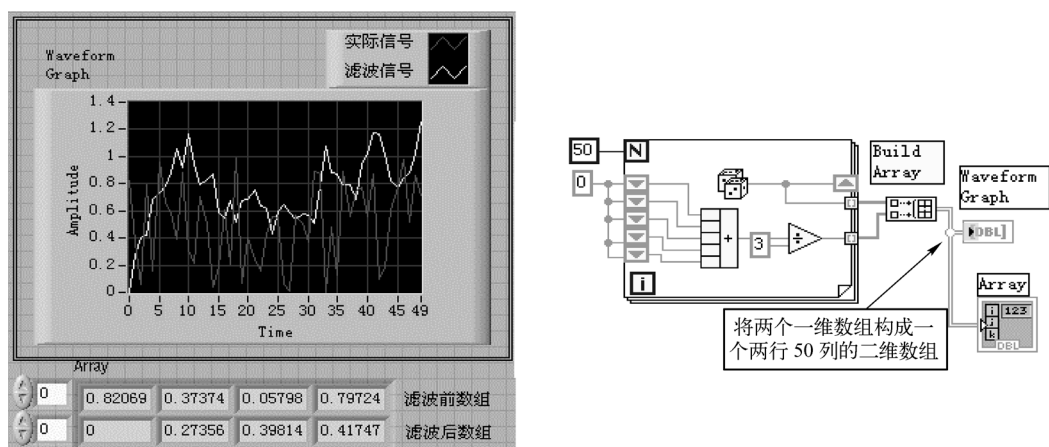


图 9-16 显示结果及框图程序

式非常适用于描述数据动态变化的规律,适用于实时数据的动态观察。图 9-17 显示了 Waveform Chart 的所有组件。其中标签 (Label)、坐标设置工具 (Scale Legend)、波形设置工具 (Plot Legend)、图形控制工具 (Graph Palette) 与 Waveform Graph 控件是相同的。不同的是, Waveform Chart 的输入是一个双精度浮点数,而 Waveform Graph 的输入是一个双精度浮点数组。这是由于两者的波形刷新方式和数据组织方法不同造成的。

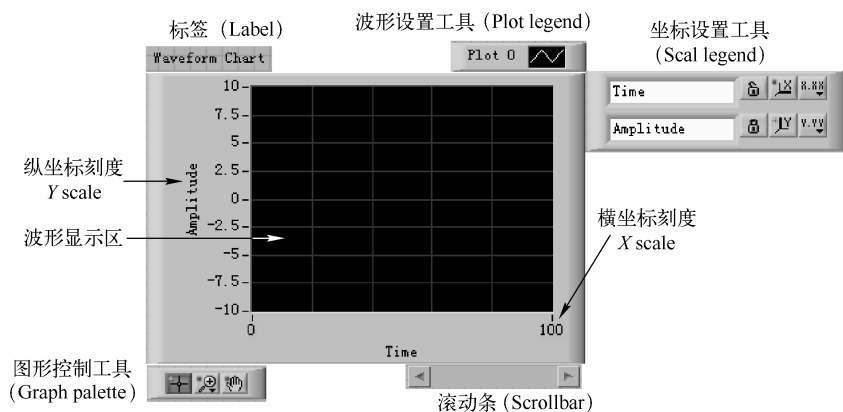


图 9-17 Waveform Chart 的组件

Waveform Graph 控件通常把要显示的数据先收集到一个数组,然后再把这组数据一次性送入控件中进行显示,而 Waveform Chart 控件是把新的数据连续添加到已有数据的后面,波形是连续向前推进显示的。

Waveform Chart 控件可一次接收一个点的数据,也可接收一组数据,不过这组数据与 Waveform Graph 中的数据组是不同的, Waveform Chart 的数据组只不过代表一个波形上的几个点,而 Waveform Graph 的数据组代表的则是整条曲线。

(2) Waveform Chart 的设置

① 数据存储长度设置

Waveform Chart 显示数据的方式是周期性的刷新显示区,并将数据存储在一块缓存区

中, 这个缓存区的大小默认值是 1024。如果需要改变这个值, 需要在 Chart 上弹出菜单并选择 Chart History Length, 在弹出对话框中修改波形存储长度。当 Chart 的横坐标值小于 Chart History Length 值时, 使用滚动条可以显示缓存区中窗口以外的数据。当选择横坐标为自动比例时, 滚动条消失, 说明数据已被全部显示。

② 刷新模式设置

Waveform Chart 有三种刷新模式, 条幅式 Strip Chart、示波器式 Scope Chart 和扫描式 Sweet Chart。默认的刷新模式是条幅式。在 Chart 弹出菜单中依次选择 Advanced → Update Mode, 可在下级弹出模板中更换刷新模式。

条幅式类似于纸带记录仪的滚动显示模式, 每接收到一个新的数据, 就显示在图线的右边缘, 原有的值依次左移。

示波器式显示模式时每接收到一个新的数据, 就把它描绘在上一个数据的右侧, 当图线画至右边界时, 就擦除这段图线, 然后再从左边开始描绘新一条线图。

扫描式与示波器式类似, 不同的是数据到达右边界时, 不将显示区清空, 而是在描绘下一条曲线的同时, 清除上一条曲线的一个数据点, 并用一条移动的垂直线界定新数据的起点, 此线随新数据的到达在显示区内横移。

③ 多波形显示方式

在一个 Chart 中显示多条曲线时, 可以使用同一个波形描绘区, 叫做层叠描绘 Overlay Plots; 或使用不同的描绘区, 叫做堆积描绘 Stack Plots。在 Chart 弹出菜单中选择 Overlay Plots 或 Stack Plots 可以进行两种布置方式的转换。

4. XY 波形记录控件 (XY Graph)

Waveform Graph 和 Waveform Chart 的横坐标都是单调均匀的, 它们不能描绘出非均匀采样的数据和某些平面曲线, 因此 LabVIEW 提供了 XY Graph 波形记录控件。XY Graph 及其端口如图 9-18 所示。

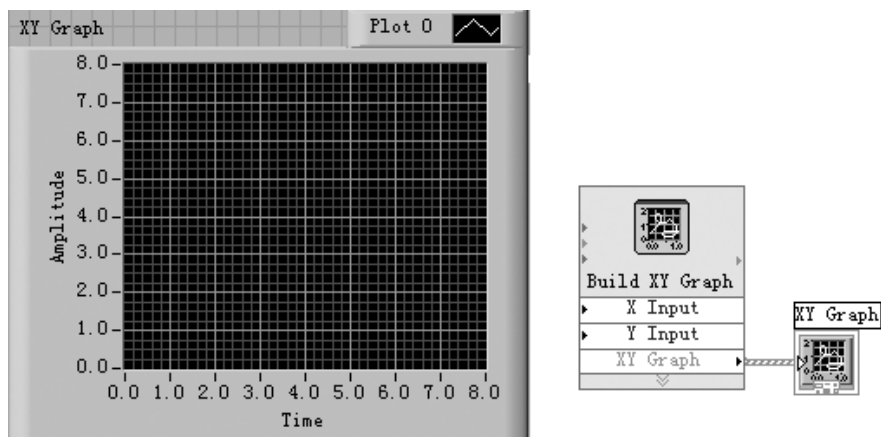


图 9-18 XY Graph 及其端口

与 Waveform Graph 相同, XY Graph 也是一次性完成波形显示刷新, 不同的是 XY Graph 的输入数据类型是由两组数据打包构成的簇, 簇的每一对数据都对应一个显示数据点的 X、Y 坐标。



任务4 知识引领——虚拟仪器的数据采集

知识4.1 数据采集系统

数据采集是自动测试和自动控制技术的重要环节，广义上的数据采集包括模拟输入和模拟输出两部分。模拟输入就是将模拟电压、电流、温度、压力等物理量转换为数字量并传递到计算机中的过程；模拟输出则是将计算机中的数字量转换成模拟电压（或电流）输出到各种指示仪表、执行机构的过程。这两种不同方向的转换常常使用同一个系统，并有许多相同的概念和术语。基于 LabVIEW 的数据采集系统如图 9-19 所示。

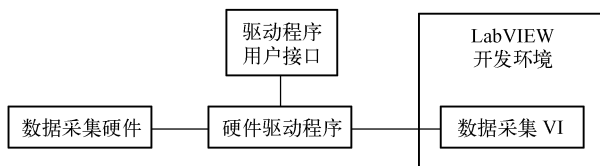


图 9-19 基于 LabVIEW 的数据采集系统

知识4.2 数据采集硬件

1. 数据采集硬件概述

数据采集硬件应该包含信号的输入、数据采集、放大和模/数转换电路。根据接口设备总线类型的不同，虚拟仪器数据采集硬件构成方式主要有 5 种形式：PC - DAQ/PCI 插卡式虚拟仪器系统、GPIB 虚拟仪器测试系统、VXI 总线虚拟仪器测试系统、串口总线虚拟仪器测试系统和 PXI 总线虚拟仪器测试系统。

对数据采集设备的驱动是实现真实物理信号采集的基础，LabVIEW 提供了各种图形化驱动程序，使得用户不必熟悉各种总线定义，直接利用这些驱动程序，就可实现数据采集的各项任务。

2. PC - DAQ/PCI 数据采集卡

在上述 5 种数据采集硬件设备中，PC - DAQ/PCI 插卡式虚拟仪器系统是最基本、最廉价的构成形式，它充分利用 PC 的机箱、总线、电源和软件资源，由插卡仪器和硬件驱动程序结合，就能执行对硬件的操作命令，完成与硬件之间的数据传输。NI 公司的 PCI - 6014 数据采集卡，以其低价位、多功能的特点在一些基本测试领域得到了应用。

图 9-20 是一个由 PCI - DAQ 插卡式虚拟仪器组成的测量系统原理图。各种传感器将非电的物理量转换为可用电信号输出，调理电路的作用是将传感器输出中含有噪声的微弱信号

经过放大、滤波等环节之后,变成规范化的标准电信号,通常是 $4 \sim 20\text{mA}$ 的标准电流信号或 $1 \sim 5\text{V}/2 \sim 10\text{V}$ 的标准电压信号。

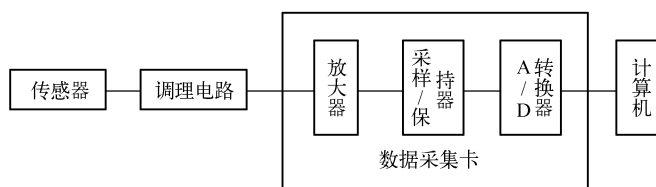


图 9-20 PCI-DAQ 虚拟仪器测量系统原理图

3. 数据采集卡的性能指标

(1) 模拟信号输入输出指标

模拟信号的通道数:输入通道数和输出通道数;模拟信号的输入方式:单端输入和差分输入;输入信号极性:单极性和双极性;模拟信号的输入范围等。

(2) A/D 转换器的指标

① 采样速率,指在单位时间内数据采集卡对模拟信号的采集次数。

② 分辨率,通常用输出二进制的位数表示,位数越多分辨率越高。

(3) D/A 转换器的指标

① 分辨率,通常用输出二进制的位数表示,位数越多分辨率越高。

② 建立时间,指从数字量输入到模拟量输出达到误差之内时所需的时间。

4. 数据采集卡的参数设置

(1) 模拟信号输入

主要是设置信号输入方式:单端还是双端,单极性还是双极性等。

(2) A/D 转换设置

需要设置通道号,采样点数、采样速率、采样结果的输出方式、采样触发方式等。

(3) D/A 转换设置

主要是设置通道号以及输出信号的幅值、数值刷新的速率等。

知识 4.3 数据采集 VI

1. 数据采集子模板

在 LabVIEW 中,用户通过 DAQ VI 来完成 DAQ 编程,所有的 DAQ VI 都包含在功能模板的数据采集子模板中。该子模板又包含 6 个下级子模块,分别是模拟信号采集、模拟信号输出、数字信号输入和输出、计数器、信号校准、参数配置、信号调理,如图 9-21 所示。

在前 4 个 DAQ VI 子模板中,根据功能不同分为 4 个子 VI,以 Analog Input 子模板为例,其子模板如图 9-22 所示。

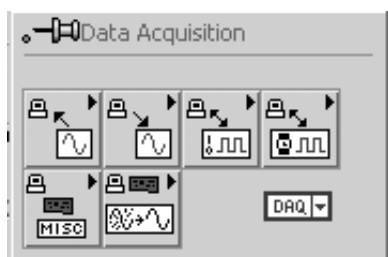


图 9-21 数据采集子模板

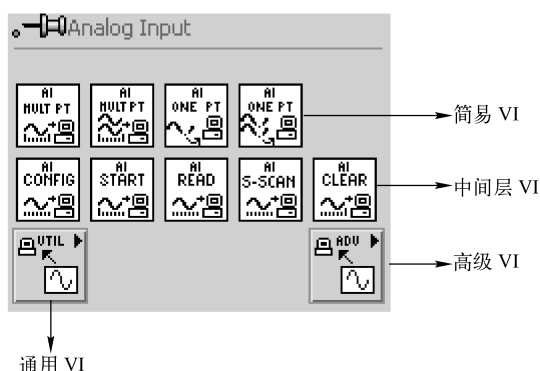


图 9-22 模拟信号输入子模板

(1) 简易 VI

简易 VI 可以执行简单的 DAQ 操作，例如，采集一路信号或输出一路信号等。可以将简易 VI 作为一个单独的 VI 来运行，也可当作一个 SubVI 来使用。如果需要执行一个基本的 DAQ 操作，仅运行一个相应的 VI 就可以了，并不需要其他 DAQ VI 的参与。

简易 VI 通常由中间级 VI 构成，它只提供最基本的输入和输出接口。对于复杂的 DAQ 应用，应该使用中间级 VI 或高级 VI，以便得到更多的功能和更好的性能。

(2) 中间层 VI

与简易 VI 相比，中间层 VI 具有更多的硬件功能，用户可以更加有效，更加灵活地开发应用程序。

(3) 通用 VI

与中间层 VI 类似。

(4) 高级 VI

高级 VI 是最底层的用户接口，用户很少会用到，只有在简易 VI 和中间级 VI 缺少某些参数，因而不能实现一些特殊的 DAQ 功能时，才会用到高级 VI。

中间级 VI 和高级 VI 有出错信息输入参数和输出参数，其数据类型是一个簇，其中包含一个布尔量，指示是否有错误发生；一个错误代码，表示发生了何种错误；还有一个值给出错误源信息或返回出错信息的 VI 名。若出错信息输入参数指出发生了错误，则该 VI 不执行任何数据采集操作，并将出错信息输出到终端。

2. 数据采集常用参数及其设置

(1) 设备号和任务号 (Device ID 和 Task ID)

在模拟 I/O、数字 I/O 及计数器 VI 中，Device ID 是一个输入参数，它是指在 DAQ 配置软件中分配给所用 DAQ 设备的编号，每一个 DAQ 设备都有一个唯一的编号与之对应。Task ID 是 Config VI 的一个输出参数，它是系统给特定的 I/O 操作分配的一个唯一的编号，贯穿于以后的 DAQ 操作的始终。

(2) 通道 (channels)

通道是模拟输入 VI 和模拟输出 VI 的一个输入参数，指定用于 DAQ 读写操作的通道。确定通道的地址是在数据采集 VI 的通道列表参数中写入通道名或通道号实现的。

(3) 输入输出范围设置

指模拟输入/输出信号的最大/最小值。它必须在 DAQ 设备所允许的范围之内。

(4) 采集数据的构成

可以用数组中的行来组织，以二维数组形式返回的采样数据。也可用二维数组中的列来组织数据。

(5) 扫描次数

扫描次数是指在用户指定的一组通道进行数据采集的次数。

(6) 采样点数

采样点数是指一个通道采样点的个数。

(7) 扫描速率

扫描速率是指每秒内完成一组指定通道数据采集的次数。

任务 5 应用实训——虚拟仪器应用实训

下面所作的虚拟仪器，都是基于 DAQ 板卡 NI PCI-6014E 的设计。

实训 5.1 正弦信号发生器设计实训

1. 实训目的

- (1) 熟悉 LabVIEW 软件的使用方法；
- (2) 掌握正弦信号发生器的设计技能。

2. 实训设备

微型计算机、NI PCI-6014E 信号采集卡、通用示波器。

3. 实训内容

(1) 虚拟正弦信号发生器功能描述

- ① 能够产生正弦波波形输出；
- ② 可调整幅值、相位、频率。

(2) 总体设计方案

① 设计目标与可行性分析

设计要求产生正弦波形，此问题不难解决，因为波形对于计算机而言只是不同的点集而已。由于 PCI6014 数据采集卡的 D/A 转换频率最高只能达到 10k sample/s，所以不可能输出很高频率的波形。

② 模块的划分

采用模块化的设计无疑会提高设计效率。正弦信号发生器可以分为两个大的模块：一个是数据产生模块，通常用数字电路产生模拟波形都需要一个数据源，在数字电路中经常采用



查表的方法实现；另一个就是数据输出模块，实际上的数据输出模块就是数据采集卡的 D/A 模块。设计的主要工作是利用软件对数据采集卡进行设定。

(3) 正弦信号发生器的设计

① 方案选择

设计方案有两种，一种就是查表法。实际上就是预先将波形存储在计算机里，需要的时候将其调出来，而相位、幅值可以根据需要对数据进行操作。至于频率，可以由输出刷新率的调整来决定。这种方法的好处在于速度比较快，但是占用较多的存储空间。同时还有一个致命的缺点，就是波形的精度是确定的，也就是说每个周期所用的点的个数相同，这对于频率范围有很大的限制。另一种是波形计算法，就是每次都把波形计算出来。这种方法的主要好处就是灵活，LabVIEW 中有现成的模块可以使用，简化了编程，但无疑对程序的执行速度是有影响的。综上所述，采用第二种方案。

② LabVIEW 中的波形发生模块

选择 Functions→Analyze→Signal Procassing→Signal Generation→Sine Wave. vi，在其输入接口中可以找到 samples、f、amplitude、phase in 等波形的的基本参数，需要指出的是这个波形发生模块仅仅是一个虚拟的波形发生器，真正输出波形的工作是由后面的模拟输出模块完成的。

Sine Wave. vi 输出的数据类型是数组类型，在输出给波形输出模块的时候，将数组部分作为波形发生模块的输出。

③ 波形输出模块的设计

波形输出模块实际上就是一个对数据采集卡的模拟输出进行设置的模块。在 LabVIEW 中有专门的模块来完成这一工作，在 LabVIEW 的功能模板上的 Functions→Data Acquisition→Analog Output 中可以找到所需要的模拟输出模块，如图 9-23 所示。

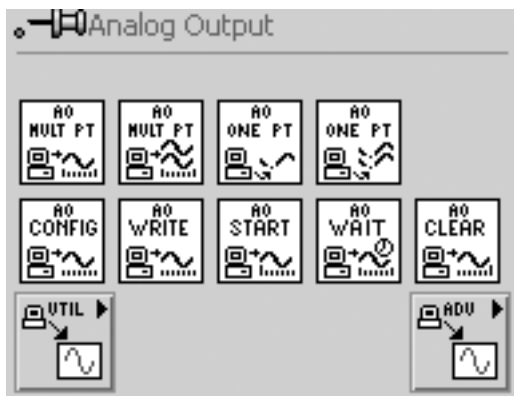


图 9-23 模拟波形输出模块

模拟波形输出模块中的简易 VI 方便易用，通常一个模块就可以完成一次输入输出任务，如图 9-24 就是利用简易 VI 中的 AO MULT PT 进行波形输出的程序框图，图 9-25 为对应的前面板图。

图 9-24 中，update rate 是在模拟输出时每一秒中输出模拟点的个数，其默认值是 1000，就是说每秒输出 1000 个点。波形发生模块的频率输入只是一个虚的概念，就是说实际决定频率的是模拟输出模块的刷新频率和用来表示一个周期所用的点数，即波形的精度。

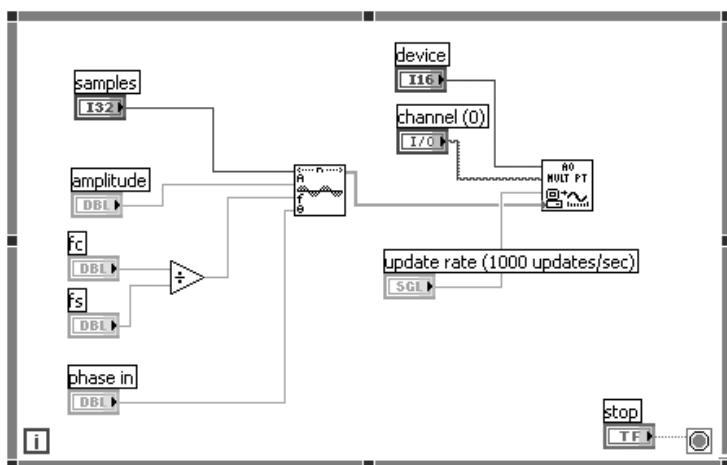


图 9-24 正弦信号发生器框图程序

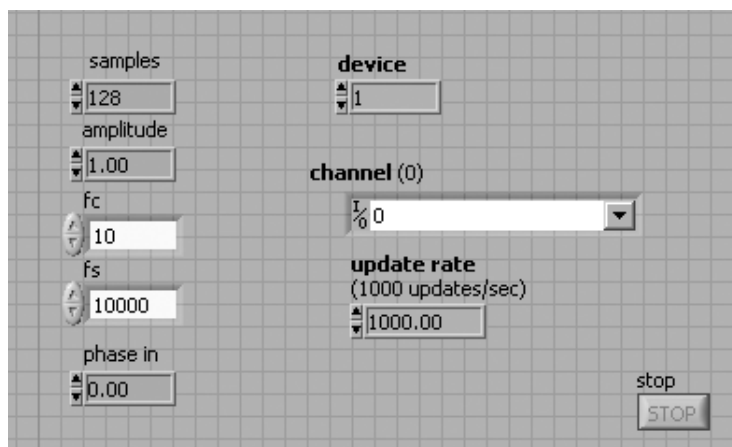


图 9-25 正弦信号发生器前面板

在运行程序时发现波形有晃动，每隔一定时间波形就有一个延迟，也就是说，波形不是连续发生的。原因是，实际上在程序中波形就不是连续发生的，而是每次循环由波形发生模块产生一些点，然后由波形输出模块输出出去，下次循环还是如此，两次循环之间的时间就是波形的延迟了。所以，使用这种简单的波形产生方法只能输出频率较低的波形。

实训 5.2 频谱分析仪设计实训

1. 实训目的

- (1) 理解信号频域分析原理与方法；
- (2) 掌握频谱分析仪的设计与使用。

2. 实训设备

微型计算机、NI PCI-6014E 信号采集卡、函数信号发生器。



3. 实训内容

(1) 虚拟频谱分析仪功能描述

- ① 可对非正弦周期信号进行频谱分析；
- ② 具有信号波形显示功能；
- ③ 具有幅度频谱显示功能。

(2) 总体设计方案

① 设计目标与可行性分析

要求对采集的波形进行频谱分析，可以采用 LabVIEW 自带的频谱分析节点来完成。要求显示信号波形和显示幅度频谱，可使用波形显示控件 Waveform Graph 来实现。由于 PCI6014 数据采集卡的 A/D 转换频率最高到 200k sample/s，也就是说每秒采集 200k 个点，根据耐奎斯特定理，输入信号的最高频率不能超过 100kHz。

② 模块的划分

虚拟频谱分析仪可分为两大模块：一个是数据采集模块，就是数据采集卡的 A/D 模块；另一个是频谱分析和显示模块，就是实现仪器功能的程序模块。

(3) 虚拟频谱分析仪的设计

① 前面板的设计

在前面板上选取 2 个波形显示控件 Waveform Graph，分别用于显示信号波形和幅度频谱，使用控件模板选取两个数值输入控件 sample rate 和 number of samples。

设计好的前面板图如图 9-26 所示。

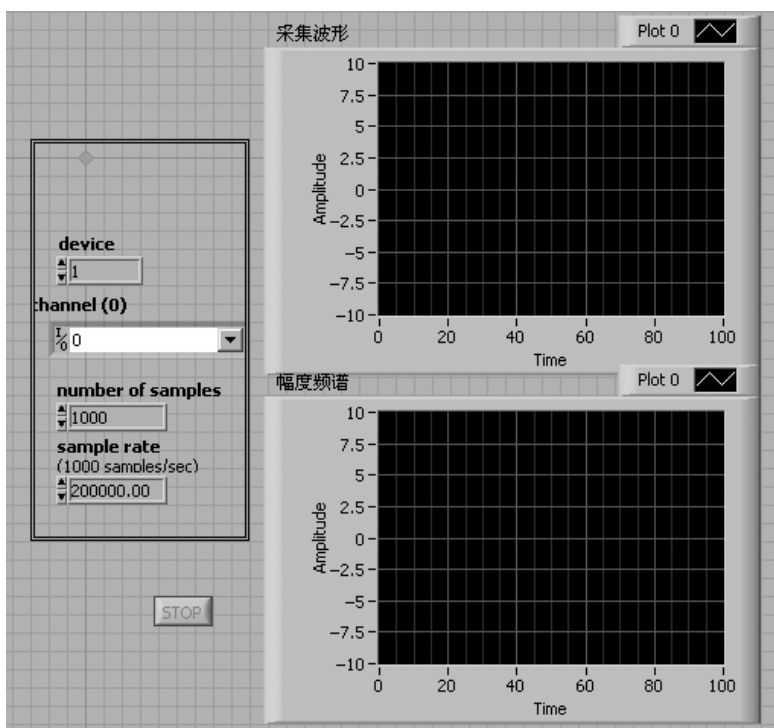


图 9-26 虚拟频谱分析仪前面板

② 框图程序的设计

数据采集模块实际上就是一个对数据采集卡的模拟输入进行设置的模块。在 LabVIEW 中有专门的模块来完成这一工作，在 LabVIEW 的功能模板上的 Functions→Data Acquisition→Analog input 中可以找到所需要的模拟输入模块。

在模拟输入节点的输入端，单击右键→create→control 的方法创建通道号和设备号。选择 Amplitude and phase spectrum 节点，然后连线。建立好的程序框图如图 9-27 所示。

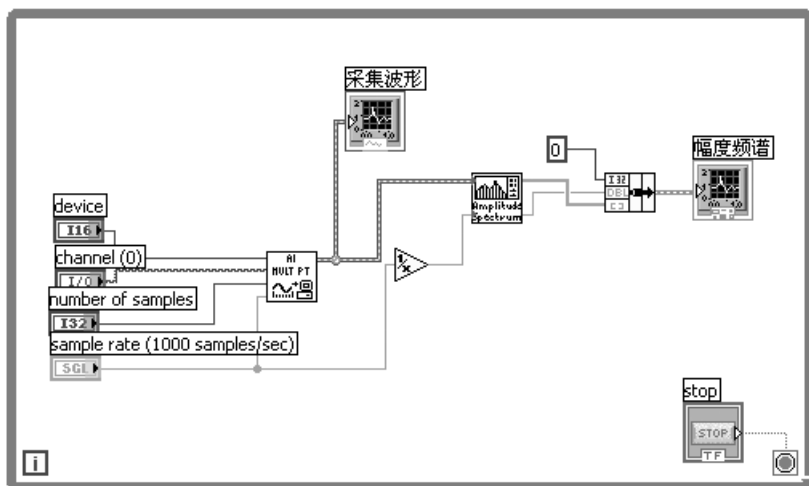


图 9-27 虚拟频谱分析仪框图程序

本章小结

1. 虚拟仪器 (Virtual Instrument, VI) 是在计算机硬件平台上，配以 I/O 接口设备，由用户自行设计虚拟控制面板和测试功能的一种计算机仪器系统。

虚拟仪器硬件平台包括计算机和 I/O 接口设备，主要完成被测输入信号的采集、放大、模/数转换。可根据实际情况采用不同的 I/O 接口硬件设备，如数据采集卡/板 (DAQ)、GPIB 总线仪器、VXI 总线仪器模块、串口仪器等。虚拟仪器软件由应用程序和 I/O 接口仪器驱动程序组成。

2. LabVIEW 是美国国家仪器公司 (NI 公司) 开发的一种基于 G 语言 (Graphics Language, 图形化编程语言) 的虚拟仪器软件开发工具。LabVIEW 是一种用图标代码来代替编程语言创建应用程序的开发工具。它以数据流编程的方法描述程序的执行。LabVIEW 用图形语言 (图标和连线) 代替文本的形式编写程序，它所具有的扩展函数库包括数据采集、GPIB 和串口仪器控制、数据显示、分析与存储等内容。

3. LabVIEW 的模板包括工具模板、控制模板、功能模板。工具模板 (Tools Palette) 提供了用于创建、编辑和修改前面板和流程图上对象的各种工具；控制模板 (Controls Palette) 是 LabVIEW 为用户设计虚拟面板而提供的，它只会在前面板编辑窗口中出现；功能模板 (Functions Palette) 是将传统仪器上的各种测试功能做成可供直接调用的库函数，并将各个库函数做成图标的形式存放在相应功能的子模板上。功能模板是 LabVIEW 为用户设计流程



图而提供的, 因此它只会在流程图编辑窗口中出现。

LabVIEW 的数据类型按其功能可以分为两类, 即常量和变量。变量又分为控制变量和显示变量。按其特征可分为数字量类型和非数字量类型, 并用不同的图标来代表不同的数据类型。

4. 基本 VI 由程序前面板 (front panel)、框图程序 (block diagram)、图标/连接端口 (icon/connector) 3 部分组成。

(1) 前面板是用于设置输入数值和观察输出结果的图形化用户界面, 前面板中的输入量被称为控制 (controls), 用来设置和修改 VI 的输入量。输出量被称为指示 (indicators), 用来指示 VI 程序输出的数据。为使前面板便于操作和美观, 还有一类控件称为装饰 (decoration), 其作用是对前面板图标进行编辑和修饰。

(2) 框图程序由节点 (node)、端口 (terminal) 和数据连线 (wire) 组成。

① 节点是程序的执行元素, 相当于文本语言中的语句、函数或子程序。LabVIEW 有 4 种节点类型: 功能函数 (functions)、结构控制 (structures)、代码端口 (CIN) 和子 VI 节点。

功能函数是执行各种数学运算、文件输入/输出等基本操作的节点。结构控制节点被用来实现结构化程序控制命令, 如循环控制、条件分支控制和顺序控制等。代码端口节点是框图程序与用户提供的 C 语言文本程序的接口。子 VI 节点是为编程方便而专门设计的一段子程序, 将其封装成功能函数节点的形式供用户调用。

② 端口是数据在框图程序和前面板之间、节点和节点之间传输而经过的端口。端口有两种类型: 控制和指示端口, 用于前面板对象和框图程序交换数据; 节点端口, 每个节点都有一个或数个数据端口, 用以输入和输出数据。

③ 数据连线代表程序执行过程中的数据流, 定义了框图内数据流动方向, 在 LabVIEW 中用不同的线型和颜色区分不同的数据类型。

项目9 思考题

1. 什么是虚拟仪器? 虚拟仪器由哪几部分组成?
2. 虚拟仪器的特点是什么? LabVIEW 具有哪些特点?
3. 基本 VI 有哪几部分组成? 各部分的功能是什么?
4. 框图程序有哪几部分组成? 各部分的功能是什么?
5. 在 LabVIEW 有几种节点类型? 各节点的功能是什么?
6. 在 LabVIEW 中有哪几种模板? 各模板的功能是什么?
7. 在 LabVIEW 中有哪些程序结构框架? 有哪些数据类型?
8. 在 LabVIEW 中数组和簇的功能是什么? 两者有什么区别?
9. 基本 For 循环由哪几部分组成? 简述其工作流程。
10. 基本 While 循环由哪几部分组成? 简述其工作流程。
11. 基本 Case Structure 由哪几部分组成? 简述其工作流程。
12. 在 LabVIEW 中主要有哪些图形显示控件? 各控件的主要功能是什么?
13. 显示控件 Waveform Graph 和 Waveform Chart 的区别是什么?
14. 显示控件 Waveform Graph 和 XY Graph 的区别是什么?



反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036



策划编辑：张 帆
责任编辑：张 帆
封面设计：孙焱津

ISBN 978-7-121-19708-6



9 787121 197086 >

定价： 元